LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 45
maggio 1972
anno V
volume VIII

Valutazione tecnologica e diodi per microonde

L'introduzione di dispositivi allo stato solido di basso prezzo per la generazione di microonde fornisce un'occasione eccezionale per tentare di predire l'influsso di uno sviluppo tecnologico sulla società

di Raymond Bowers e Jeffrey Frey

Negli ultimi anni il concetto di valutazione tecnologica, cioè il tentativo di anticipare gli effetti dell'introduzione di nuove tecnologie, siano essi positivi o negativi, è stato largamente trattato (si veda l'articolo *La valutazione della tecnologia* di Harvey Brooks e Raymond Bowers in « Le Scienze », n. 21, maggio 1970). Non si sono però fatti molti progressi nel modo di valutare effettivamente una tecnologia. In questo articolo tentiamo una valutazione del genere prendendo come esempio la tecnologia dei dispositivi a microonde allo stato solido, attualmente in fase di rapida evoluzione. Il nostro tentativo non può essere esauriente; per esempio è oltre la nostra competenza determinare le conseguenze sociali della tecnologia delle microonde proprio come, nel 1950, sarebbe stato per chiunque difficile prevedere l'intero influsso sociale della televisione.

Il termine microonda si riferisce alla lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche. Sebbene la gamma delle microonde nello spettro elettromagnetico non sia definita con esattezza, usiamo abitualmente questo termine per indicare le radiazioni aventi la lunghezza d'onda compresa fra 30 centimetri e 3 millimetri. La gamma dei corrispondenti valori di frequenza si estende da un gigahertz (un miliardo di cicli al secondo) a 100 gigahertz (*si veda l'illustrazione in basso alle pagine 16 e 17*).

Per piú di trenta anni sono stati sviluppati dispositivi che generano e ricevono microonde; essi sono largamente usati per le comunicazioni, la navigazione e le applicazioni industriali dell'elettronica. Fra le applicazioni tipiche rammentiamo: le trasmissioni televisive e telefoniche, il radar e il controllo delle macchine. Di solito però i generatori a microonde attualmente in servizio sono costosi: per esempio generatori costituiti da tubi elettronici del tipo klystron e magnetron costano molte centinaia di migliaia o addirittura milioni di lire; di conseguenza la maggior parte dei sistemi a microonde sono gestiti da militari e industriali.

È probabile che questo stato di cose cambi radicalmente nel prossimo decennio. Al momento attuale sono in fase di sviluppo generatori a microonde di basso costo e di alta affidabilità che probabilmente costeranno solo poche migliaia di lire quando saranno prodotti in grande serie. Si tratta di dispositivi allo stato solido sviluppati a seguito del lavoro sperimentale di ricercatori come W. Thornton Read jr., dei Laboratori Bell e J. B. Gunn dell'IBM, i quali dimostrarono che alcune sostanze, per esempio l'arseniuro di gallio, il silicio e il germanio, possono generare o amplificare, in certe condizioni, segnali elettrici nella gamma delle microonde.

In particolare quattro dispositivi, che nel futuro saranno della piú grande importanza, hanno raggiunto uno sviluppo soddisfacente. Essi sono l'oscillatore di Gunn; il diodo LSA (iniziali delle parole *limited space-charge accumulation*, accumulazione limitata di carica spaziale) inventato da John Copeland dei Laboratori Bell; i diodi Read e IMPATT (dalle parole *impact ionization avalanche transit time*, tempo di transito di ionizzazione a valanga d'urto) i quali sono fra loro fondamentalmente simili e il diodo TRAPATT (dalle parole *trapped plasma avalanche triggered transit*, transito a valanga controllata di plasma). Questi dispositivi, se usati in circuiti opportuni, funzionano come conduttanze negative; una tensione a microonde applicata ai loro terminali provoca il passaggio di una corrente sfasata di 180 gradi rispetto alla tensione. Al contrario delle conduttanze positive, nelle quali tensione e corrente sono in fase con conseguente assorbimento di energia, le conduttanze negative possono trasformare l'energia della corrente continua, fornita da una batteria o da qualsiasi altra sorgente, in energia a microonde.

Dalla tendenza degli sviluppi si può prevedere che i dispositivi a microonde si troveranno presto sul mercato a prezzi che tutti potranno permettersi, con il probabile risultato che si moltiplicheranno i sistemi a microonde per automobili, battelli e usi domestici. Sono già sul mercato forni a microonde per cucina, ma il nostro articolo si riferisce a sorgenti a microonde di potenza notevolmente minore. Si può prevedere che anche organizzazioni commerciali impiegheranno su larga scala sorgenti a microonde per trasmettere informazioni e controllare processi industriali. I dispositivi a microonde pos-

4 GIGAHERTZ ----------------------
4 e 6 GIGAHERTZ ——————
6 GIGAHERTZ —·—·—
6 e 11 GIGAHERTZ -·-·-·-·-
11 GIGAHERTZ ------------

sono moltiplicarsi quanto i televisori.

Da parecchio tempo è stata utilizzata la fascia delle microonde nello spettro delle radiofrequenze e in particolare quella compresa fra uno e dieci gigahertz: uno dei principali impieghi non militari è rappresentato dalle comunicazioni. Gli esistenti collegamenti per comunicazioni a grande distanza occupano generalmente le bande da 3,7 a 4,2 gigahertz e da 5,925 a 6,425 gigahertz. Quando queste bande saranno saturate verranno autorizzati nuovi collegamenti nella banda fra 11,7 gigahertz a 12,2 gigahertz.

Poiché le microonde non seguono la curvatura terrestre è necessario per i lunghi collegamenti l'uso di ripetitori che ricevano, amplifichino e ritrasmettano il segnale. Nelle due bande inferiori delle microonde la distanza fra i ripetitori viene determinata in funzione della curvatura della Terra, delle caratteristiche del terreno e delle altezze delle antenne: è normale una distanza fra i ripetitori di circa 50 chilometri. In un ripetitore tipico il costo dell'elettronica (eccettuate le antenne) può essere meno del 10 per cento del costo totale; inoltre a ogni terminale devono essere installate costose apparecchiature per commutare le conversazioni entranti e uscenti sui circuiti appropriati. Comprendendo il costo di questi dispositivi nel costo globale di un collegamento funzionante al di sotto di 10 gigahertz, la quota attribuibile ai componenti a microonde è esigua. Quindi impiegando dispositivi allo stato solido nei sistemi al di sotto di 10 gigahertz non si ottiene una sostanziale riduzione di costo.

L'attenuazione del segnale causata dalla propagazione nell'atmosfera diventa un fattore essenziale oltre i 10 gigahertz e perciò i ripetitori devono essere disposti a distanze inferiori: a 12 gigahertz la massima distanza raggiungibile è di circa 6,5 chilometri, a 18 gigahertz è di 3,7 chilometri e a 30 gigahertz di 2,1 chilometri. I costi degli apparati a microonde possono in tal caso costituire una notevole frazione del costo totale. Componenti per microonde allo stato solido relativamente economici schiudono lo spettro al di sopra di 10 gigahertz ai collegamenti per comunicazioni a grande distanza e potrebbero quindi avere un ruolo di considerevole importanza.

Un altro campo di applicazione dei dispositivi per microonde allo stato solido si troverà certamente nelle comunicazioni dirette satellite-terra. I dispositivi a microonde saranno componenti importanti dei televisori predisposti per la ricezione diretta dai satelliti.

Una recente conferenza sulle radiotrasmissioni tenutasi a Ginevra ha assegnato tre nuove bande nelle microonde (da 22,5 a 23; da 41 a 43 e da 84 a 86 gigahertz) alle comunicazioni satellite-terra. Può darsi benissimo che i sistemi a microonde saranno usati anche per trasmissioni televisive aprendo un altro vasto campo di applicazione ai dispositivi per microonde allo stato solido come per esempio gli oscillatori dei ricevitori televisivi.

Fra i nuovi sviluppi delle sorgenti di microonde allo stato solido è da annoverare anche la possibilità di un importante progresso nei sistemi di comunicazione per mezzi mobili terrestri: per esempio potrebbero diventare di uso comune i telefoni sulle automobili. Attualmente non è possibile installare tali telefoni in gran numero poiché, a questo scopo, è assegnata solamente una ristretta banda dello spettro; però se potessero essere utilizzate bande nella gamma delle microonde o delle onde millimetriche sarebbe possibile estendere il servizio. Sistemi di questo genere nella gamma delle onde metriche sono direzionali e hanno una piccola portata cosicché sarebbe necessario avere un gran numero di terminali locali per ricevere e ritrasmettere il segnale emesso da un'automobile durante i suoi spostamenti. Sarebbe necessario anche un sistema di ricerca dell'automobile per i messaggi in arrivo; forse anch'esso richiederebbe l'impiego delle microonde.

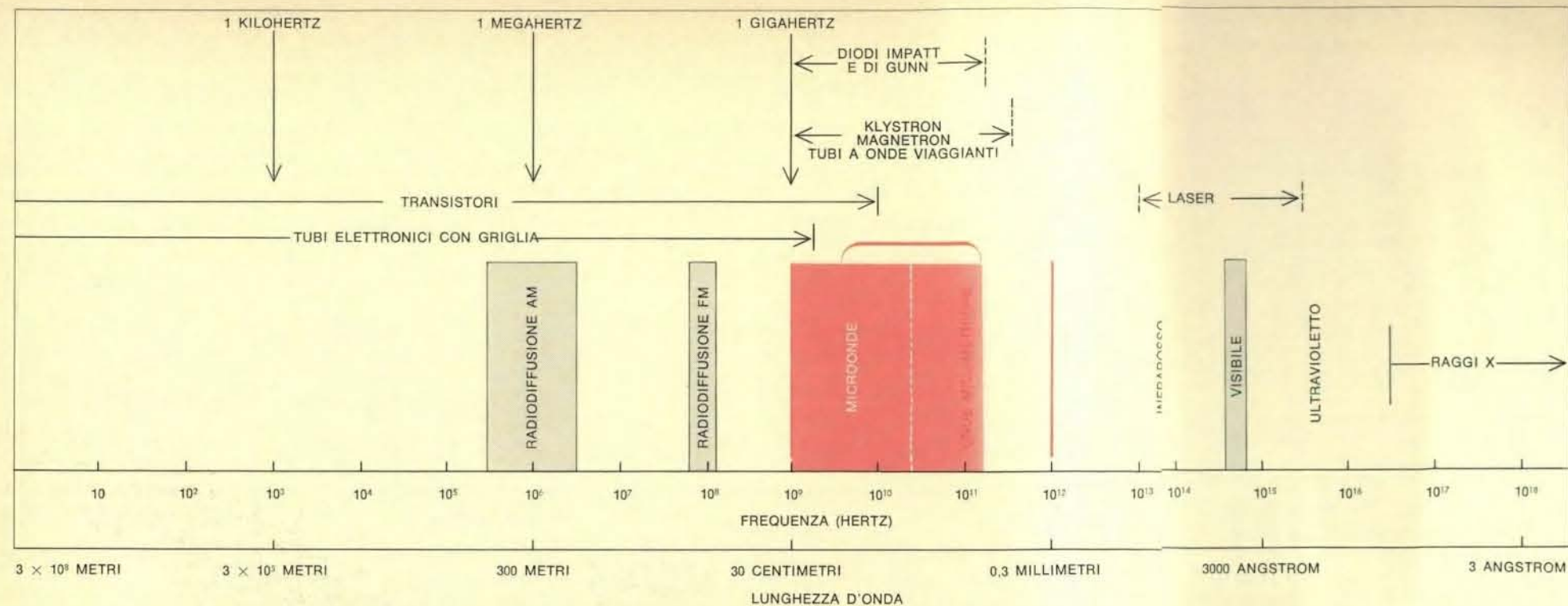
Nel campo della guida e del controllo, che comprende il radar, la radiolocalizzazione e altre operazioni, è previsto che la disponibilità di dispositivi per microonde allo stato solido dia luogo piuttosto all'espansione delle applicazioni esistenti che non a nuove utilizzazioni. Sarà possibile fra breve dotare gli aerei leggeri tanto di radar-altimetro quanto di radar anticollisione a costi paragonabili a quelli degli altri equipaggiamenti elettronici aeronautici. Una possibilità è anche il radar meteorologico, ma esso richiederà potenze di picco più elevate di quelle probabilmente disponibili entro il prossimo decennio.

Un nuovo e ampio mercato potrebbe presentarsi con l'installazione di radar sulle automobili per rivelare le corsie libere, segnalare gli ostacoli, realizzare il pilota automatico e mettere in funzione i dispositivi di protezione passiva, per esempio i sacchi d'aria: infatti, i dispositivi accelerometrici che comunemente comandano i sacchi d'aria al momento dell'impatto devono gonfiare il sacco in un tempo talmente breve che il rumore che accompagna l'operazione è quasi quello di un'esplosione; un normale impulso di sgancio del radar potrebbe assicurare la frazione di secondo supplementare necessaria per ridurre questo inconveniente.

Dei sistemi a microonde sono già usati nelle apparecchiature antifurto e hanno possibilità di sviluppo come segnalatori di incendio. Negli USA una società elettrica sta per collaudare un sistema automatico di lettura dei contatori costituito da un ricetrasmettitore a microonde che interroga, da bordo di un autocarro, dei piccoli « risponditori » automatici installati in ciascuna abitazione ottenendo la lettura del contatore che sarà poi registrata su nastro magnetico. I sistemi a microonde potrebbero anche essere impiegati per seguire il percorso degli autobus, dei mezzi di manutenzione, delle vetture di polizia e di altri veicoli dei quali è necessario conoscere la posizione. Si possono prevedere applicazioni delle microonde anche nei controlli di processo (conteggio, controllo di spessori ecc.), nella medicina e nella biologia per scopi come l'accertamento di alterazioni nei sistemi circolatorio e respiratorio.

Lo sviluppo di nuove applicazioni delle microonde e l'estensione di quelle attuali potrebbero arrecare considerevoli benefici. L'intero sistema delle comunicazioni potrebbe essere migliorato con l'impiego delle frequenze al di sopra di 10 gigahertz alleggerendo cosí la congestione nelle frequenze piú basse. Le nuove sorgenti forniscono anche mezzi potenzialmente economici o realizzabili solo con grande difficoltà mediante sistemi su vettore fisico. Come abbiamo già accennato, i sistemi a microonde hanno la possibilità di migliorare i trasporti, diminuire i danni degli incendi, aiutare la scoperta di crimini e favorire la cura della salute.

Questi benefici saranno accompagnati da numerosi problemi che dovranno essere presi rapidamente in considerazione se occorrerà estendere i vantaggi della tecnologia delle microonde. La maggior parte di questi problemi sono collegati al fatto che una grande proliferazione delle apparecchiature a microonde provocherebbe forti richieste di occupazione di parte dello spettro elettromagnetico e si risolverebbe in

La prossima saturazione di parte dello spettro per le comunicazioni a microonde è indicata dai fasci colorati su questa mappa dell'area metropolitana di New York. I percorsi, che non presentano tante interferenze reciproche quanto potrebbe far pensare la mappa a causa del gran numero di frequenze diverse rappresentano ponti radio per comunicazioni varie.

In questo diagramma è rappresentata la porzione dello spettro elettromagnetico che comprende la regione delle microonde (*in colore*). La regione delle microonde è definita in vari modi ed è per tale motivo che il colore si affievolisce verso le frequenze piú alte. La maggior parte delle attuali applicazioni delle microonde occupano la gamma da 1 a 10 gigahertz. La grande maggioranza di queste usano, come sorgente di microonde, costosi klystron e magnetron. I due diodi menzionati nel diagramma sono le sorgenti allo stato solido poco costose da cui ci si attende la possibile espansione delle applicazioni delle microonde.

numerose interferenze reciproche non solo fra questi dispositivi, ma anche con altri sistemi elettronici. Inoltre occorre esaminare attentamente la possibilità di un pericolo per la salute causato dall'esposizione diffusa alla radiazione a microonde.

È in corso di acquisizione una somma di esperienze e si sta elaborando una serie di accordi internazionali per controllare i sistemi a microonde (per lo piú militari e industriali): questi sono attualmente negli USA non piú di alcune diecine di migliaia di unità e il loro costo singolo è compreso fra 100 000 e 10 milioni di dollari. Se il prezzo unitario diminuisse a circa 1000 dollari, e i sistemi a microonde fossero installati su aerei leggeri, grandi battelli privati e grossi autocarri, il loro numero potrebbe forse raggiungere il milione. Anche con queste quantità i problemi sarebbero relativamente semplici rispetto a quelli che si presenterebbero se il prezzo unitario scendesse a circa 100 dollari e i sistemi venissero installati su automobili e autocarri. La società è semplicemente impreparata ad affrontare il numero dei sistemi (probabilmente 100 milioni) che verrebbero in questo caso posti in servizio.

Esaminiamo piú da vicino il problema iniziando con la questione della ripartizione dello spettro elettromagnetico. Non piú tardi del 1965 era possibile osservare che lo spettro al di sopra di 10 gigahertz in quel momento si trovava in condizioni singolari poiché la banda risultava utilizzata per relativamente pochi servizi. Però oggi la banda da 10,7 a 11,7 gigahertz è stata assegnata a nuovi ponti radio fissi; quella da 12,7 a 12,95 gigahertz ai ripetitori televisivi mentre la maggior parte dei collegamenti satellite-terra può utilizzare frequenze ben oltre 12 gigahertz. A queste attività, che hanno un notevole potenziale di incremento, è stata necessariamente assegnata la banda al di sopra di 10 gigahertz solo a causa dell'affollamento nella parte piú bassa dello spettro senza che vi fosse una qualsiasi convenienza tecnologica.

Negli Stati Uniti sono state assegnate fasce dello spettro per usi specifici fino a 90 gigahertz (*si veda l'illustrazione in basso*); proposte recenti estenderebbero le assegnazioni delle fasce fino a 300 gigahertz.

AMPLIAMENTO DELLE TELEVISIONI SCOLASTICHE
RADAR PER PICCOLE IMBARCAZIONI RADIOLOCALIZZAZIONE
RADAR PER PICCOLI AEREI
RADIOASTRONOMIA
RADAR PER PICCOLI AEREI
RADAR PER AEREI E PICCOLE IMBARCAZIONI
AMPLIAMENTO DEI SERVIZI DI COMUNICAZIONE VIA SATELLITE
PONTI RADIO PER RIPRESE TELEVISIVE DIRETTE
AMPLIAMENTO DEGLI USI PRIVATI
AMPLIAMENTO
RADAR PER PICCOLI AEREI
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE DI AUTOVEICOLI
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE DI AUTOVEICOLI
AMPLIAMENTO
AMPLIAMENTO GENERALE
RADAR PER BATTELLI AMPLIAMENTO DELLA TELEVISIONE
AMPLIAMENTO
GRANDE AMPLIAMENTO DELLA TELEVISIONE SU CAVO
PONTI RADIO PER L'INDUSTRIA, I TRASPORTI TERRESTRI, L'AVIAZIONE E LA SICUREZZA PUBBLICA

TELEVISIONE EDUCATIVA, TRASPORTI TERRESTRI ECC.
RADAR MARITTIMI E RADIOLOCALIZZAZIONI
PONTI RADIO FRA PUNTI FISSI (TELEFONO, TELEGRAFO) SATELLITI PER COMUNICAZIONI
RADAR E RADAR-ALTIMETRI
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE PER AEREI
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE PER AEREI E NAVI
PONTI RADIO, SATELLITI PER COMUNICAZIONI
COMUNICAZIONI INDUSTRIALI, SERVIZI PER TRASPORTI TERRESTRI, MARITTIMI E AEREI E DI SICUREZZA PUBBLICA
SERVIZI AUSILIARI TELEVISIVI, RIPETITORI INTERCITTÀ ECC.
SATELLITI PER COMUNICAZIONI, SATELLITI METEOROLOGICI
SATELLITI PER COMUNICAZIONI
RICHERCHE SPAZIALI INDUSTRIA ECC.
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE PER AEREI
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE, RADAR METEOROLOGICI
RADIOAMATORI, RADIOLOCALIZZAZIONE, IN COMUNE CON IL GOVERNO
INDUSTRIA, TRASPORTI TERRESTRI, MARINA E SICUREZZA PUBBLICA
PONTI RADIO FRA PUNTI FISSI
PONTI RADIO PER RIPRESE TELEVISIVE DIRETTE E SERVIZI MARITTIMI
INDUSTRIA, TRASPORTI TERRESTRI, MARINA, AVIAZIONE E SICUREZZA PUBBLICA
RIPETITORI TELEVISIVI, SERVIZI AUSILIARI TELEVISIVI
SERVIZI AUSILIARI TELEVISIVI
RADAR E RADIOLOCALIZZAZIONE PER USI AEREONAUTICI

2,5 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
FREQUENZA (GIGAHERTZ)

Nella figura sono mostrati gli impieghi delle microonde nella fascia dello spettro fra 2,5 e 14 gigahertz secondo gli usi attuali (*in nero*) e previsti (*in colore*) negli USA. Le attribuzioni vengono effettuate dalla Commissione federale per le comunicazioni. Le zone tratteggiate rappresentano le fasce dello spettro riservate per l'uso governativo. Tutte le bande assegnate a servizi radar e di radiolocalizzazione sono inoltre ripartite con le Agenzie del governo federale che esercitano le stesse attività.

FREQUENZA (MEGAHERTZ)	UTILIZZAZIONE
1700 - 1790	Servizi fissi (ponti radio) e, in via secondaria, servizi mobili. Servizi ausiliari e satelliti per meteorologia
1790 - 2110	Servizi fissi e, in via secondaria, servizi mobili
2110 - 2120	Telecomandi di meccanismi spaziali e ricerca negli spazi lontani
2120 - 2290	Servizi fissi e, in via secondaria, servizi mobili
2290 - 2300	Come sopra, più ricerche spaziali (telemisurazioni e « inseguimento » negli spazi lontani)
2300 - 2450	Servizi fissi e, in via secondaria, servizi mobili. Radiolocalizzazione. Servizio d'amatore
2450 - 2550	Servizi fissi e, in via secondaria, servizi mobili. Radiolocalizzazione
2550 - 2690	Servizi fissi e mobili
2690 - 2700	Radioastronomia
2700 - 2900	Radionavigazione aereonautica e, in via secondaria, radiolocalizzazione. Solo installazioni terrestri. In futuro anche con apparecchiature aereotrasportate in grado di operare solo su questa banda e solo se attivate da radar posti al suolo Radar terrestri per usi meteorologici
2900 - 3100	Radar terrestri per radionavigazione e, in via secondaria, radiolocalizzazzione
3100 - 3400	Radiolocalizzazione
3400 - 3600	Servizi fissi e mobili e telecomunicazioni da satelliti a terra e, in via secondaria, radiolocalizzazione. È possibile anche l'utilizzo di emissioni per telecomunicazioni e per « inseguimento » di stazioni spaziali operanti sulla stessa banda
3600 - 4200	Servizi fissi e telecomunicazioni da satelliti a terra. In via secondaria, servizi mobili
4200 - 4400	Radionavigazione aereonautica
4400 - 4700	Servizi fissi e mobili e telecomunicazioni da terra a satelliti
4700 - 4800	Servizi fissi e mobili purché non provochino interferenze con i servizi di osservazione astronomica
4800 - 4990	Servizi fissi e mobili
4990 - 5000	Servizi fissi e mobili e radioastronomia
5000 - 5250	Radionavigazione aereonautica come da 2690 a 2700 MHz
5250 - 5255	Radiolocalizzazione e, in via secondaria, ricerca spaziale
5255 - 5350	Radiolocalizzazione
5350 - 5470	Radionavigazione aereonautica e, in via secondaria, radiolocalizzazione. L'impiego per radionavigazione è limitato a radar d'aereoporto e apparati di bordo di aereomobili commerciali
5470 - 5650	Radionavigazione marittima (radiofari). In via secondaria radiolocalizzazione. Da 5600 a 5650 MHz possono funzionare anche radar terrestri per usi meteorologici
5650 - 5670	Radiolocalizzazione e, in via secondaria, ricerca spaziale e servizio d'amatore
5670 - 5725	Radiolocalizzazione e, in via secondaria, ricerca spaziale e servizio d'amatore
5725 - 5800	Radiolocalizzazione. Telecomunicazioni da terra a satelliti e, in via secondaria, servizi d'amatore
5800	Applicazioni industriali, scientifiche e mediche
5800 - 5850	Radionavigazione. Telecomunicazioni da terra a satellite e, in via secondaria, servizio d'amatore
5850 - 6425	Servizi fissi e mobili. Telecomunicazioni da terra a satelliti
6425 - 6450	Servizi fissi e mobili
6450 - 6575	In Italia, radiolocalizzazione
6575 - 7120	Servizi fissi e mobili
7120 - 7130	Servizi fissi e mobili. Questa banda può essere utilizzata per servizi spaziali previ accordi tra i governi interessati
7130 - 7200	Servizi fissi e mobili
7200 - 7250	Servizi fissi e mobili. Su questa banda possono essere utilizzati servizi ausiliari a mezzo satelliti per meteorologia aventi banda passante di 100 MHz
7250 - 7300	Telecomunicazioni da satellite a terra. Banda utilizzata anche per inseguimento e telemisurazioni
7300 - 7750	Servizi fissi e mobili e telecomunicazioni da satellite a terra, come da 7200 a 7250 MHz
7750 - 7900	Servizi fissi e mobili
7900 - 7975	Servizi fissi e mobili. Telecomunicazioni da terra a satellite
7975 - 8025	Telecomunicazioni da terra a satellite
8025 - 8400	Servizi fissi e mobili. Telecomunicazioni tra terra e satelliti
8400 - 8500	Servizi fissi e mobili e ricerca spaziale
8500 - 8750	Radiolocalizzazione
8750 - 8850	Radiolocalizzazione e radionavigazione aeronautica limitatamente alle apparecchiature di bordo utilizzanti l'effetto Doppler su una frequenza centrale di 8800 MHz
8850 - 9000	Radiolocalizzazione
9000 - 9200	Radionavigazione aereonautica, come da 1300 a 1350 MHz e, in via secondaria, radiolocalizzazione
9200 - 9300	Radiolocalizzazione
9300 - 9500	Radionavigazione limitatamente a radar meteorologici d'aereomobile e radar terrestri. In questa banda i radar terrestri per scopi meteorologici hanno la priorità sui dispositivi di radiolocalizzazione
9500 - 9800	Radiolocalizzazione
9800 - 9975	Radiolocalizzazione e, in via secondaria, servizi fissi
9975 - 10 000	Radiolocalizzazione e, in via secondaria, servizi fissi. Questa banda, fino a 10 025 MHz può essere utilizzata per radar meteorologici installati su satelliti meteorologici

Suddivisione in base all'utilizzazione delle frequenze da 1,7 a 10 gigahertz secondo il Regolamento Internazionale delle Telecomunicazioni (Convenzione di Ginevra del 1969). Questa tabella si riferisce alla cosiddetta « zona 1 », zona nella quale è compresa l'Italia.

L'affollamento dello spettro cambia da luogo a luogo: alcune bande sono sature in posti ben differenti come la città di New York e la città di Venice nella Louisiana. Il carattere delle località determina il tipo di saturazione. New York, centro di commerci, comunicazioni e divertimenti, è afflitta dalla saturazione nelle bande dei ponti radio da 3,7 a 4,2 gigahertz e da grave affollamento nelle altre due bande assegnate ai ponti radio sotto i 12 gigahertz; la zona petrolifera intorno a Venice ha le bande assegnate a servizi speciali e di sicurezza che sono quasi sature. Il sistema di assegnazione delle fasce seguito dalla Commissione federale per le comunicazioni non ammette la cessione ai servizi speciali e di sicurezza dello spettro assegnato ai ponti radio o viceversa. In certi luoghi il problema della saturazione di bande specifiche è in aumento come risultato di questa politica e dello sviluppo di sistemi commerciali a microonde.

Si deve quindi presumere che non appena saranno disponibili sistemi affidabili ed economici ci sarà l'utilizzazione estensiva dello spettro al di sopra di 10 gigahertz. Se si deve far posto al gran numero di sistemi impliciti nelle applicazioni potenziali delle tecniche delle microonde l'unica loro evidente sistemazione è sopra i 10 gigahertz. Poiché i dispositivi per microonde allo stato solido abbracciano una gamma di frequenze estesa fino a 100 gigahertz, è attraente supporre che un eventuale incremento di un fattore 10 nella gamma disponibile delle microonde possa essere sufficiente per tutte le applicazioni previste.

Si potrebbero prendere numerosi provvedimenti per facilitare la preparazione della proliferazione dei sistemi a microonde. In primo luogo dovrebbero esser fatte delle previsioni sui probabili usi dello spettro delle microonde. Tali previsioni dovrebbero riguardare delle comunità con densità di popolazione variabile che possiedano tutti i sistemi di microonde prevedibili.

In secondo luogo dovrebbe essere stabilita un'adeguata piattaforma di dati per fare le previsioni e per correlarle con la situazione effettiva. Una delle esigenze per minimizzare l'affollamento delle frequenze è l'esatta conoscenza di come lo spettro è usato: cioè una serie di dati nella forma adatta all'elaborazione con un calcolatore contenente informazioni sulla ubicazione, frequenza, potenza irradiata e distribuzione spettrale della potenza per ogni trasmettitore futuro o già installato. Fino a poco tempo fa l'American Telephone and Telegraph Company era la sola organizzazione che ha raccolto molte di queste informazioni, almeno per le bande dei ponti radio. Riteniamo che una adatta organizzazione statale dovrebbe sviluppare e gestire un sistema piú completo. Senza un'adeguata piattaforma di dati sarà necessario riservare bande di guardia eccessivamente ampie a entrambi i lati di ogni allocazione dello spettro allo scopo di evitare sovrapposizioni.

Un terzo suggerimento è l'opportunità di riesaminare il principio dell'assegnazione di fasce di frequenza nello spettro delle microonde. La semplice assegnazione di fasce è eccessivamente rigida come mostrano gli esempi delle città di New York e di Venice. Il sistema dovrebbe essere realizzato in modo da prevedere esplicitamente la flessibilità. Se si tiene conto della direttività e della polarizzazione di ciascun fascio è possibile assegnare piú volte la medesima frequenza anche nella stessa zona. In piú dovrebbero essere stabilite le prestazioni richieste per i vari servizi e per le varie regioni dello spettro, applicabili sia ai trasmettitori sia ai ricevitori.

Desideriamo notare che può presentarsi un altro problema se saranno disponibili generatori di microonde a basso prezzo. Il fatto che i generatori di microonde attualmente in funzione sono molto costosi ha indotto naturalmente a sviluppare gli altri componenti dei sistemi stessi in tipi costosi e di alta qualità allo scopo di ottimizzare lo sfruttamento dei generatori. Tuttavia i nuovi generatori rendono possibili sistemi meno raffinati. È prevedibile che alcuni fabbricanti per diminuire i costi sacrificheranno l'apertura del fascio e la precisione del controllo di frequenza. Questa evoluzione è probabile specialmente per i dispositivi con potenza inferiore al livello per il quale normalmente sono imposte una licenza e delle norme severe.

In questo campo ricade sugli ingegneri la grande responsabilità di garantire che questi dispositivi a bassa potenza non siano « inquinanti » dal punto di vista elettromagnetico. La questione è se il costruttore ha la facoltà di stabilire norme per mantenere la larghezza di banda, l'ampiezza del fascio e la potenza entro i livelli minimi occorrenti per raggiungere l'obiettivo di un dato sistema. Norme di questo genere implicano il principio della conservazione di una risorsa naturale – lo spettro elettromagnetico – che dovrebbe essere applicato se è previsto o meno il problema della congestione. Se questa grossa responsabilità non verrà assunta dai costruttori si renderanno indubbiamente necessari regolamenti e controlli governativi.

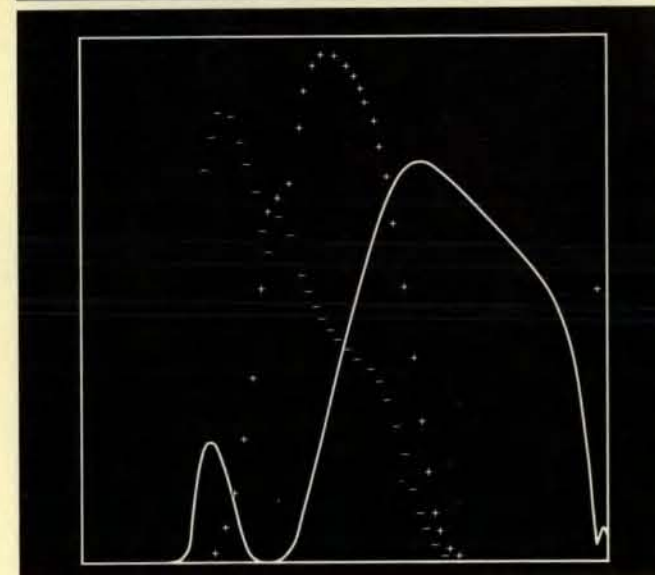
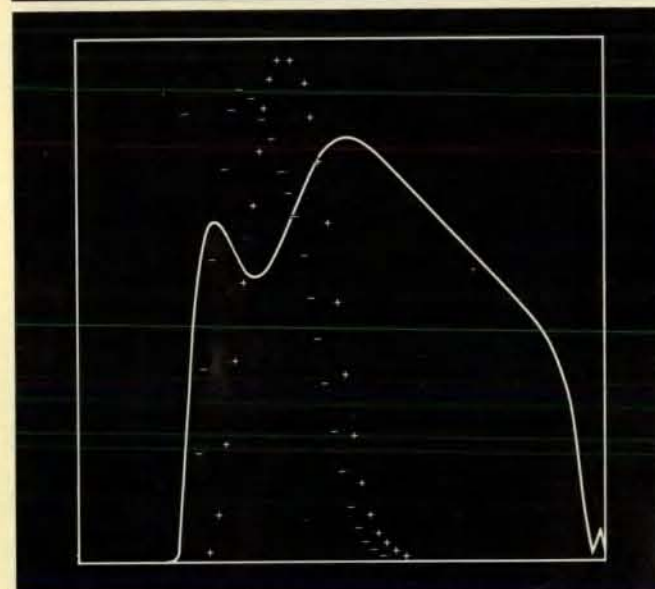
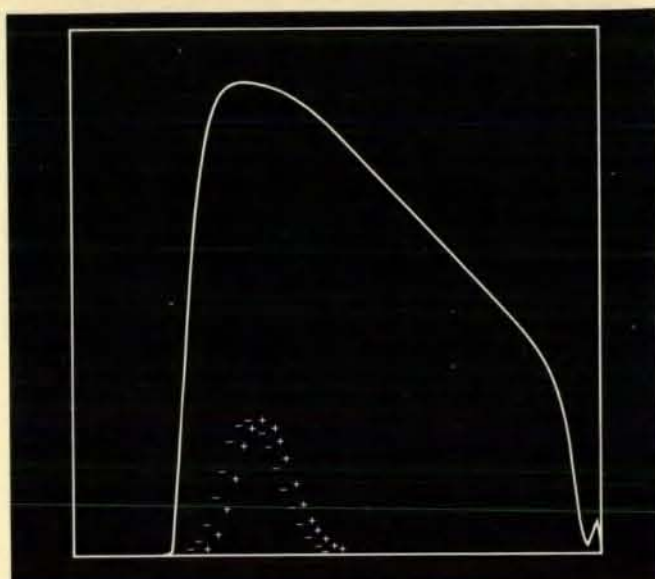
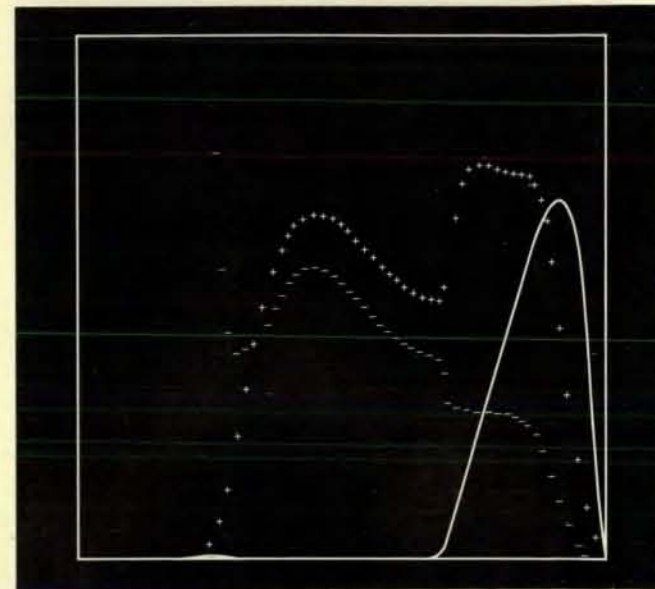
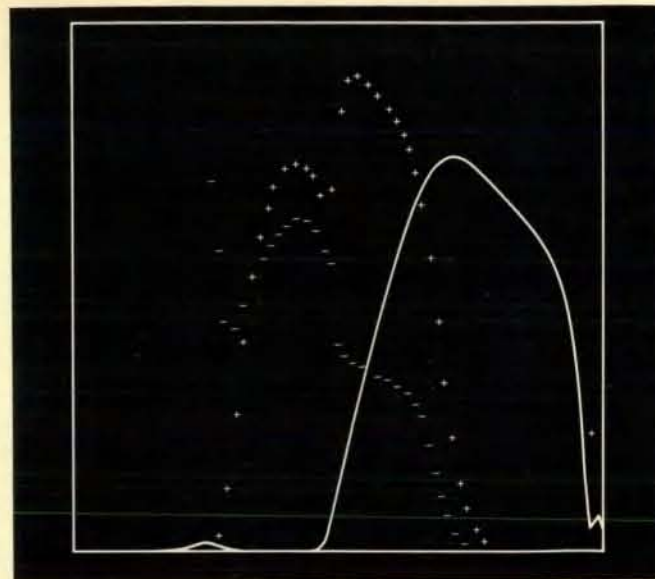
Un campo dove è indispensabile la massima attenzione dei fabbricanti e dei tecnici per facilitare la conservazione dello spettro è quello della progettazione delle antenne. Non sembra che le tecniche per la progettazione di antenne ad alta direttività e poco costose (quali per esempio paraboloidi in fibra di vetro o strutture in materiale dielettrico) abbiano proceduto di pari passo con i progressi delle sorgenti a microonde. Una possibilità è lo sviluppo di antenne attive, in grado cioè di fornire una certa amplificazione all'estremità ricevente del collegamento; esse permetterebbero l'uso di trasmettitori di potenza minore di quella altrimenti richiesta. Inoltre per applicazioni particolari dovrebbero essere scelte frequenze opportune (ogni volta che è possibile) per sfruttare il vantaggio dell'attenuazione naturale del segnale nell'atmosfera e impedire che il segnale si propaghi oltre la zona cui è destinato. Se lo studio tecnico sarà stato eseguito correttamente molti dispositivi a microonde a bassa potenza non arrecheranno un fastidio superiore a quello di un lampo.

Ci sembra che occorrerebbe interessarsi alla possibilità che i dispositivi a microonde vengano impiegati nei giocattoli e nei sistemi nei quali la trasmissione su filo potrebbe assolvere il compito egualmente bene. Qualcuno sostiene che, siccome lo spettro delle frequenze è una risorsa esauribile, esso non dovrebbe essere usato per scopi banali o per scopi che possano essere soddisfatti in altro modo. Riteniamo che sarebbe impossibile evitare lo sviluppo di simili applicazioni; certamente seguire tale indirizzo avrebbe come conseguenza una limitazione nell'uso dello spettro che lederebbe i diritti di parecchi costruttori. Sembra però molto piú realistico supporre che tali sistemi verranno sviluppati e quindi assegnar loro delle gamme di frequenza ben separate da quelle assegnate a sistemi che svolgono compiti piú essenziali. Può venire il momento in cui lo spettro sarà cosí affollato che dovrà essere imposto un divieto per tutti i nuovi sistemi di trasmissione a microonde che assolvano una funzione eseguibile altrettanto bene su cavo.

Recentemente un altro tipo di interferenza, non collegato con la sovrapposizione, ha attirato l'attenzione su di sé. Le radiazioni a microonde possono interferire, talvolta con effetti sfavorevoli, col funzionamento di alcuni sistemi elettronici non a microonde, anche a bassi livelli di potenza. Per esempio, la dispersione di forni a microonde è stata responsabile del funzionamento difettoso di alcuni *pace-makers* per il cuore. Secondo il Ministero della sanità degli Stati Uniti, il livello di radiazione necessario per causare un'interferenza è dell'ordine di 5 microwatt al centimetro quadrato: questo livello di potenza potrebbe essere benissimo presente anche a discrete distanze dai sistemi che abbiamo citato.

Riprendiamo ora in considerazione le microonde come un possibile pericolo per la salute. Siccome è ragionevole supporre che un gran numero di sistemi a microonde saranno in possesso di privati, e quindi relativamente incontrollati, è necessario e urgente indagare gli effetti biologici delle radiazioni a microonde. Le norme che vennero stabilite quando i sistemi a microonde erano abbastanza rari e quando era improbabile che l'uomo della strada fosse irradiato da un fascio a microonde potranno essere insufficienti allorché questi saranno emessi da molte automobili, segnali per il traffico e antenne dei servizi pubblici.

Si può ottenere l'ordine di grandezza delle dimensioni del problema prendendo in considerazione il numero di automobili equipaggiate con il radar. Su un'automobile un radar anticollisione può avere una potenza media di 50 milliwatt; se questa potenza viene irradiata in un fascio di due gradi di apertura la densità di potenza a cinquanta metri di distanza dal veicolo sarebbe maggiore di 100 microwatt al centimetro quadrato. È improbabile che qualcuno possa essere irradiato da un solo fascio per un qualunque intervallo di tempo, ma sarebbe esposto ai fasci di molti veicoli. I futuri livelli di potenza emessa dalle unità radar delle automobili non hanno importanza secondo le norme di sicurezza in vigore negli USA contrariamente a quanto potrebbe avvenire secondo le norme adottate nell'Europa orientale. Ritorneremo su questo punto.

Non c'è dubbio che per gli organismi viventi le radiazioni a microonde possono essere nocive, ma c'è una notevole discordanza di opinioni sui livelli di irradiazione necessari per provocare effetti rilevanti, sulla persistenza di questi effetti e sulle circostanze fisiologiche che li determinano. Negli uomini sono documentati casi di danni ai testicoli e di cateratte e casi di morte negli animali esposti sperimentalmente all'irraggiamento con microonde. Probabilmente questi effetti sono stati causati da riscaldamento dovuto all'assorbimento di energia a microonde a livelli di potenza molto superiori a quelli sopra citati. Comun-

Distribuzione delle cariche all'interno di un diodo TRAPATT in sei istanti diversi (*dall'alto in basso*) realizzata mediante la simulazione di un elaboratore ideato da D. L. Scharfetter dei Laboratori Bell. In opportune condizioni circuitali è possibile far scorrere un grande impulso di corrente nella direzione in cui il diodo normalmente non conduce, producendo un veloce aumento del campo elettrico (*linea continua*) che raggiunge i valori occorrenti per generare elettroni (*segni negativi*) e buche (*segni positivi*) in eccesso rispetto a quelli ottenibili in condizioni normali. La separazione dei portatori di cariche di segno opposto dà luogo a una carica spaziale che riduce il valore del campo elettrico. In pratica, la zona mobile di generazione della valanga attraversa il diodo lasciando dietro di sé una densa carica di plasma e un campo elettrico di basso valore.

que sono stati riferiti effetti piú insidiosi a bassi livelli di potenza. Essi sono chiamati effetti « atermici » poiché sembra che non siano attribuibili al riscaldamento. Questi effetti comprendono mutazioni nelle estremità delle radici di aglio cresciuto in un campo ad alta frequenza e per alcuni animali una tendenza a reagire in vari modi a tali campi.

La quantità di energia a microonde assorbita da un oggetto dipende dalle proprietà elettriche dell'oggetto stesso e dalla frequenza (e quindi dalla lunghezza d'onda) della radiazione rispetto alle dimensioni dell'oggetto. Il corpo umano incomincia ad assorbire la radiazione in modo notevole quando la frequenza supera circa 15 megahertz. La capacità di assorbire microonde varia con le parti del corpo e anche col tempo. Le microonde penetrano nel grasso a una profondità circa 10 volte maggiore che nel muscolo e tale differenza si riflette probabilmente sull'assorbimento. Alcuni organi sono sensibili agli effetti del riscaldamento e in modo particolare gli occhi e i testicoli.

Gli effetti atermici non sono stati presi in considerazione quando il Ministero della sanità degli USA ha stabilito a un valore medio di 10 milliwatt al centimetro quadrato per esposizioni di lunga durata il limite di sicurezza normale raccomandato per la radiazioni. Gli effetti atermici sono stati presi in considerazione solo quando l'URSS ha fissato la misura massima di 10 microwatt al centimetro quadrato per giornata lavorativa, un valore 1000 volte piú piccolo di quello determinato negli USA. Numerosi ricercatori americani sono però scettici su molti risultati russi e di conseguenza considerano le norme russe come inutilmente rigide. Ma lo scetticismo non è una base valida per stabilire le norme.

Le norme degli USA sono state fissate in base ai risultati di un programma sugli aspetti biomedici delle radiazioni a microonde svolto fra il 1957 e il 1961 congiuntamente dalle tre armi. Alcuni studiosi ritengono questa ricerca non applicabile al caso delle radiazioni a microonde di bassa potenza perché in essa non si è tenuto conto degli effetti atermici e per l'apparente tendenza dei ricercatori a respingere i dati dell'Europa orientale sugli effetti atermici. Questi effetti comprendono segni di ipertensione, disturbi del ritmo cardiaco e diminuzione nella sensibilità di vari organi sensoriali. I livelli medi di potenza per i quali venivano notati questi effetti si trovavano al di sopra di 30 microwatt al centimetro quadrato e le frequenze erano di solito comprese fra quelle ultra elevate e quelle della parte bassa dello spettro – una gamma nella quale l'assorbimento attraverso la pelle e le ossa del cranio è scarso. Recenti esperimenti negli USA avrebbero dimostrato che l'attività metabolica del cuore dell'embrione del pulcino viene turbata da radiazione a 24 gigahertz e che lo sviluppo delle pupe di insetti può essere sfavorevolmente interessato da radiazioni a 10 gigahertz. Ambedue questi esperimenti richiedono livelli di potenza troppo bassi per produrre un riscaldamento notevole.

Un altro fattore che è stato trascurato nello stabilire le norme attualmente in vigore negli USA è il ciclo d'uso della radiazione applicata, cioè la percentuale di tempo durante il quale viene emessa la radiazione. In un esperimento su due gruppi di conigli, in nessun individuo del primo gruppo sottoposto per un'ora a radiazione in onda continua avente un livello di 80 milliwatt al centimetro quadrato si svilupparono le cateratte, mentre queste si svilupparono in tutti gli individui del secondo gruppo sottoposto a radiazione a impulsi con un livello di 400 milliwatt al centimetro quadrato e con un ciclo d'uso del 20 per cento (e quindi irradiato con la medesima potenza media del primo gruppo). Perciò può non essere sufficiente una norma di radiazione basata esclusivamente sulla potenza media.

Quel che risulta chiaro da questa discussione è che gli effetti delle radiazioni a microonde sui sistemi biologici sono scarsamente conosciuti. È quindi necessario eseguire molte piú ricerche in questo campo mettendo in evidenza gli effetti delle basse potenze e riesaminare le norme di sicurezza prima della proliferazione dei dispositivi a microonde. Questo studio dovrebbe interessarsi non solo degli esseri umani ma anche degli altri sistemi biologici. Se questa ricerca non verrà effettuata, si avrà certamente una polemica pubblica non appena i dispositivi si saranno moltiplicati, proprio come è accaduto con le radiazioni a basso livello emesse dai reattori nucleari. Nel caso delle microonde è tuttora possibile fare indagini sugli effetti delle radiazioni a basso livello prima di un aumento massiccio del numero dei dispositivi a microonde.

L'ultimo argomento che desideriamo trattare riguarda la preoccupazione che molti hanno manifestato sulla possibilità che i nuovi sviluppi dell'elettronica possano essere usati per violare la riservatezza della vita privata. Uno degli aspetti di questo problema è che – quando saranno trasmesse piú informazioni mediante fasci di microonde – banche, organizzazioni industriali e altri utenti di questi collegamenti si preoccupino dell'eventualità che le informazioni vengano intercettate.

Abbiamo fatto un esame preliminare della questione sulla vita privata e siamo pervenuti alla conclusione provvisoria che le nuove sorgenti non costituiscono un problema particolare poiché non aggiungono una nuova dimensione alla perdita della riservatezza. Sotto certi aspetti sembra persino che i nuovi sistemi a microonde abbiano alcuni vantaggi rispetto alle linee telefoniche nell'assicurare la segretezza. Per intercettare un fascio di microonde lo si deve trovare e la sua posizione non può ovviamente essere fisicamente evidente. Per di piú sembra probabile che le trasmissioni a frequenza doppia saranno piú facili nella gamma delle microonde che non nelle linee telefoniche. Con questo sistema su una frequenza viene trasmesso un messaggio codificato mentre sulla seconda si trasmette il codice. Chiunque cerchi di intercettare l'informazione dovrà trovare ambedue le frequenze e sarà ostacolato anche dal fatto che il segnale in codice può occupare una banda estremamente ristretta.

Se qualcuno è veramente deciso a intercettare l'informazione è quasi impossibile impedirglielo per un tempo illimitato. La preoccupazione deve essere quella di rendere l'intercettazione tanto difficile da scoraggiare la pratica casuale o abituale. Quando una grande quantità di informazioni deve essere trasmessa con sistemi a microonde è prudente codificarla anche in maniera semplice.

Vorremmo mettere in evidenza che nessuna delle nostre conclusioni sulla tecnologia delle microonde è definitiva e che nel nostro panorama sull'avvenire di questa tecnologia non abbiamo trattato alcune importanti questioni. Nel complesso, la nostra intenzione è stata di avviare la discussione su questi problemi e di indicare i campi nei quali è indispensabile un'analisi piú particolareggiata. Confidiamo specificamente che il mondo dei tecnici dedicherà, nelle riunioni e nelle pubblicazioni, la sua attenzione a questi problemi sollecitando la collaborazione dei sociologi (che possono portare un prezioso contributo per la valutazione delle vaste conseguenze sociali dei dispositivi a microonde) come pure dei fisici e degli esperti in tecnologia. Una parte della responsabilità pubblica del mondo dei tecnici e dei ricercatori risiede nel prestare la dovuta attenzione proprio a questi problemi.

L'esperienza modifica il cervello?

Ratti tenuti in un ambiente artificiale «stimolante» per 30 giorni presentano notevoli modificazioni anatomiche e biochimiche del cervello

di Mark R. Rosenzweig, Edward L. Bennett e Marian Cleeves Diamond

L'esperienza produce qualche osservabile cambiamento nel cervello? L'ipotesi che l'anatomia del cervello possa venire modificata dall'esperienza è antica, ma prove convincenti di tali cambiamenti sono state trovate soltanto nell'ultimo decennio. È stato infatti dimostrato che mantenendo un animale di laboratorio in una situazione ambientale piú o meno stimolante si possono determinare misurabili cambiamenti sia nell'anatomia che nella chimica del cervello. In qual modo questi cambiamenti siano legati ai meccanismi dell'apprendimento e della memoria è il tema di ricerche interdisciplinari in corso che interessano tecniche neurochimiche, neuroanatomiche e del comportamento.

Il primo resoconto di modificazioni cerebrali determinate dall'esperienza che siamo riusciti a rintracciare, è stato scritto dall'anatomico italiano Michele Gaetano Malacarne nel 1780. Vale la pena di descrivere brevemente le sue ricerche dato che esse assomigliano molto a quelle che noi stiamo eseguendo nel nostro laboratorio presso l'Università di California, a Berkeley. Egli fece esperimenti su due cani di una stessa cucciolata, due cardellini e due tordi, avendo cura di prendere ogni coppia di uccelli da una stessa covata. Egli addestrò poi un animale di ogni coppia per un lungo periodo di tempo, lasciando l'altro animale al di fuori dell'addestramento. Alla fine egli uccise gli animali e ne esaminò il cervello, riscontrando che il cervelletto degli animali addestrati presentava un numero di circonvoluzioni superiore rispetto agli animali non addestrati. Benché la sua ricerca fosse stata notata da qualcuno dei suoi contemporanei non ci risulta che altri abbiano tentato esperimenti di questo genere.

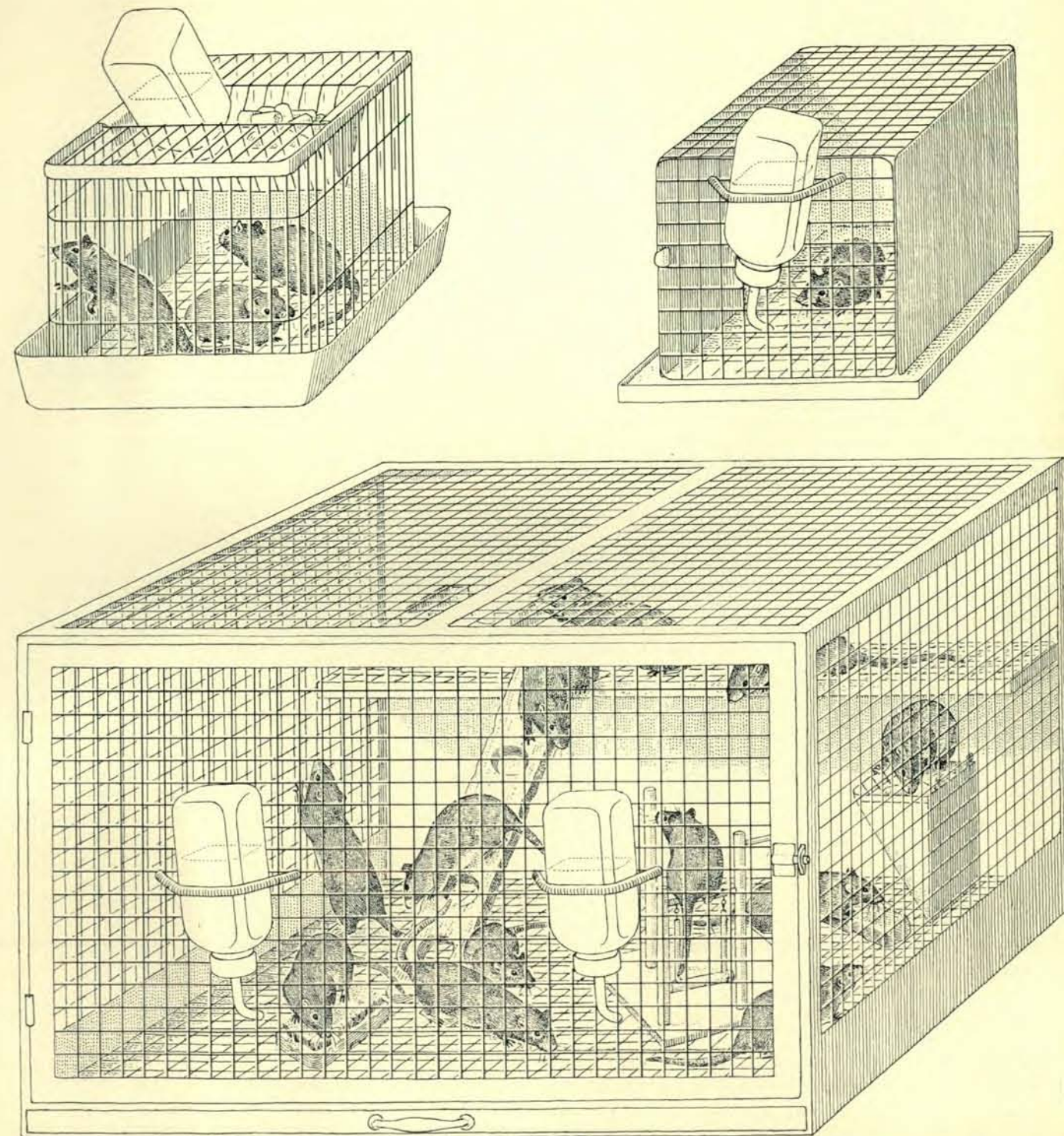
Nel corso del XIX secolo vi è stato un interesse considerevole per le possibili relazioni fra le dimensioni della testa umana, la capacità intellettiva e quella di apprendere. Verso il 1870 il famoso medico e antropologo francese Paul Broca confrontò la circonferenza della testa di un certo numero di studenti in medicina con quella di alcuni infermieri, riscontrando che gli studenti avevano teste piú grandi. Poiché egli riteneva che i due gruppi di giovani fossero ugualmente capaci, concluse che le differenze nelle dimensioni della testa fossero dovute al differente addestramento subito dai giovani dei due gruppi. Certamente la logica di Broca non era impeccabile; infatti ci sono altre possibili spiegazioni dei risultati delle sue osservazioni. I suoi critici misero in rilievo il fatto che non vi è corrispondenza fra le dimensioni del cranio e il volume cerebrale e che la misura del cranio è legata alle dimensioni del corpo e all'età. Intorno all'inizio del XX secolo non soltanto la ricerca sperimentale non riuscí a dimostrare che l'addestramento determina dei cambiamenti nella anatomia macroscopica del cervello, ma si sviluppò la convinzione che tali cambiamenti non potessero essere rilevati; cosí la ricerca in questo settore venne abbandonata.

Con lo sviluppo di nuovi strumenti e tecniche biochimiche negli anni '50, alcuni ricercatori cominciarono a chiedersi se non fosse possibile accertare modificazioni chimiche nel cervello eventualmente conseguenti all'addestramento. Essi tentarono di individuare cambiamenti a livello delle sinapsi che trasmettono gli impulsi da una cellula nervosa all'altra o a livello degli acidi nucleici (RNA e DNA) delle cellule nervose. Le tecniche usate per cercare variazioni chimiche o anatomiche nel cervello causate dall'addestramento non sono difficili, ma devono essere utilizzate con rigore poiché molti dei cambiamenti che si verificano non sono affatto vistosi. Ecco come viene effettuata un'esperienza di base con ratti di un dato ceppo. (Nelle nostre ricerche abbiamo lavorato con diversi ceppi di ratti e con topi, osservando effetti simili in tutti questi animali.) A una data età, spesso al momento del divezzamento, gruppi di tre maschi vengono prelevati da ogni cucciolata. Di solito usiamo una dozzina di gruppi formati da tre maschi. Questo metodo fornisce risultati piú definibili e attendibili che non lavorando con un solo gruppo, come faceva Malacarne.

L'utilizzazione di roditori per questi studi è conveniente per molte ragioni. La dissezione del cervello è piú semplice nei roditori che nei carnivori o nei primati perché la corteccia cerebrale dei roditori è liscia e senza circonvoluzioni. La corteccia grigia può essere separata dalla sottostante materia bianca piú facilmente che nei mammiferi piú evoluti. I roditori sono piccoli, poco costosi e molto prolifici, cosicché animali con uno stesso patrimonio genetico possono essere posti in condizioni sperimentali diverse. Inoltre, i genetisti hanno selezionato ceppi *inbred* di ratti e topi (ottenuti cioè mediante ripetuti incroci tra fratelli) che consentono un ulteriore controllo genetico degli animali che noi usiamo.

I tre ratti maschi prelevati da ogni figliata sono distribuiti casualmente in modo che un ratto rimanga nella gabbia standard di laboratorio insieme con gli altri ratti, un ratto sia sistemato in un ambiente stimolante e il terzo in un ambiente povero di stimoli. Si deve mettere in rilievo che queste due definizioni non sono usate in senso assoluto, ma soltanto in relazione all'ambiente standard in cui si trovano in laboratorio gli animali, ambiente che costituisce la situazione di riferimento per le ricerche anatomiche, biochimiche, fisiologiche, della nutrizione e del comportamento.

Nelle condizioni standard di laboratorio pochi ratti vivono in una gabbia di dimensioni adeguate con cibo e acqua sempre disponibili (*si veda l'illustrazione in questa pagina*). Nell'ambiente stimolante diversi ratti vivono in una gabbia spaziosa e attrezzata con una varietà di oggetti con i quali gli animali possono giocare. Ogni giorno viene disposto nella gabbia un nuovo assortimento di oggetti, prelevati da un insieme di 25. Nell'ambiente privo di stimoli, ogni ratto vive solo in una gabbia. All'inizio questi ratti venivano anche tenuti in una stanza isolata e tranquilla, ma questo accorgimento si dimostrò inutile.

Alla fine di un periodo sperimentale predeterminato, che può andare da pochi giorni a diversi mesi, i ratti vengono sacrificati e il loro cervello rimosso. La dissezione del cervello e l'esame di ogni gruppo di tre animali della stessa figliata vengono effettuati in successione immediata, ma secondo un ordine casuale e contrassegnati soltanto da un numero di codice. In questo modo, la

Rappresentazione di tre ambienti sperimentali che causano differenze anatomiche nel cervello di ratti appartenenti alla stessa figliata. Nella colonia standard di laboratorio vi sono di solito tre ratti per gabbia (*in alto a sinistra*). Nell'ambiente « privo di stimoli » un ratto è lasciato solo (*in alto a destra*). Nell'ambiente « stimolante » 12 ratti vivono insieme in una gabbia spaziosa e attrezzata con oggetti per giocare che vengono cambiati ogni giorno. In tutti e tre gli ambienti, cibo e acqua sono disponibili.

persona che effettua la dissezione ignora da quale gabbia proviene l'animale. Con l'esperienza, un tecnico specializzato può effettuare la dissezione con una precisione e attendibilità considerevoli. Per delimitare le varie regioni corticali, si utilizza una piccola squadra di plastica a T calibrata (*si veda l'illustrazione nella pagina a fronte*). I campioni prelevati da una regione corticale sono pesati con un'approssimazione dell'ordine del decimo di milligrammo e quindi conservati in ghiaccio secco. I campioni vengono mantenuti congelati finché le analisi chimiche per determinare l'attività degli enzimi che controllano la trasmissione nervosa non venga effettuata.

Se i cervelli dei ratti devono essere utilizzati per esami anatomici, gli animali vengono anestetizzati e perfusi con una soluzione fissatrice. Successivamente, sezioni dei cervelli vengono preparate per l'esame microscopico.

Negli anni '50 noi abbiamo tentato di mettere in relazione le differenze individuali nel comportamento dei ratti posti nella situazione di affrontare e risolvere problemi con le differenti quantità di acetilcolinesterasi nel cervello. (In quel periodo e fino al 1966 faceva parte del nostro gruppo lo psicologo David Krech.) L'enzima inibisce l'attività dell'acetilcolina, un mediatore chimico delle cellule nervose. Il mediatore in eccesso, infatti, deve essere rapidamente neutralizzato perché gli impulsi nervosi possano seguire l'uno all'altro con una frequenza di qualche centinaio per secondo. Questa attività enzimatica è spesso misurata in termini di peso di tessuto, per cui nei nostri primi esperimenti noi registravamo il peso di ogni campione di tessuto cerebrale prelevato per l'analisi chimica. Trovammo indicazioni sufficienti per affermare che il livello della acetilcolinesterasi cerebrale viene modificato

I recinti all'aperto della Stazione per lo studio del comportamento animale dell'Università di California a Berkeley costituiscono un ambiente seminaturale adatto per lo studio degli effetti dell'esperienza sul cervello animale. Quando acqua e cibo vengono dati regolarmente, all'aperto i ratti geneticamente omogenei crescono benissimo. I ratti riapprendono a scavare tane, attività che i loro progenitori, vissuti nelle gabbie dei laboratori, non hanno svolto per piú di 100 generazioni.

negli animali sottoposti a test per valutare la loro capacità di affrontare e risolvere problemi. Queste indicazioni ci spinsero a cercare gli eventuali effetti di esperienze piú estese. Con nostra sorpresa rilevammo che esperienze differenti non solo influenzavano l'attività enzimatica, ma modificavano anche il peso dei campioni di cervello.

Intorno al 1964 verificammo che ratti che avevano trascorso da 4 a 10 settimane in ambienti stimolanti o non stimolanti presentavano le seguenti differenze: i ratti del primo gruppo avevano una corteccia cerebrale di maggior peso e di maggior spessore; possedevano una maggiore attività acetilcolinesterasica totale, ma una attività enzimatica minore per unità di peso del tessuto. Inoltre, questi ratti presentavano una maggiore attività di un altro enzima: la colinesterasi, enzima che si trova nelle cellule gliali e nei capillari sanguigni che circondano le cellule nervose. Le cellule gliali svolgono una varietà di funzioni, compreso il trasporto di materiale fra i capillari e le cellule nervose, la formazione della guaina lipidica che riveste l'assone e la rimozione del tessuto neurale morto.

Successivamente trovammo che il numero delle cellule gliali presenti nei ratti tenuti in un ambiente stimolante era superiore rispetto a quello dei ratti tenuti in un ambiente privo di stimoli e ciò può spiegare il fatto che nei primi si verifica un aumento dell'attività colinesterasica. Sebbene esperienze differenti non determinino modificazioni nel numero di cellule nervose per unità di tessuto, verificammo che l'ambiente stimolante produce corpi e nuclei cellulari piú grandi. Questi corpi cellulari piú grandi indicano una maggiore attività metabolica. Ulteriori determinazioni chimiche riguardanti l'RNA e il DNA confermarono questa osservazione.

La quantità di DNA per milligrammo di tessuto diminuiva, presumibilmente perché aumentava la massa della corteccia mentre il numero dei neuroni, il cui nucleo contiene una quantità fissa di DNA, rimaneva relativamente costante. Virtualmente inalterata rimaneva la quantità di RNA per milligrammo, determinando un aumento significativo del rapporto RNA/DNA, e questo suggerisce una maggiore attività metabolica. Nella maggior parte degli esperimenti le maggiori differenze fra esperienze in ambienti piú o meno stimolanti furono riscontrate nella corteccia occipitale, che è grosso modo il terzo posteriore della superficie corticale.

Le aree corticali di un cervello di ratto sono prescelte per la dissezione mediante una squadra a T di plastica che permette di assicurare campioni uniformi. Le sezioni scelte vengono rimosse, pesate e conservate in ghiaccio secco. La rimanente corteccia e la parte subcorticale del cervello vengono anch'esse pesate e congelate per eventuali confronti.

Non sappiamo perché la regione occipitale della corteccia sia interessata dalla esperienza stimolante piú delle altre regioni. Sulle prime pensammo che responsabili potessero essere le differenze nelle stimolazioni visive, ma quando usammo ratti ciechi, la corteccia cerebrale continuò a presentare differenze significative negli animali tenuti in ambienti stimolanti rispetto a quelli tenuti in ambienti diversi. Riscontrammo gli stessi effetti quando ratti normali venivano messi in ambienti differenti, avendo cura di tenerli al buio per tutto il corso dell'esperienza. Questo non vuol dire naturalmente che la privazione della vista non ha alcun effetto sull'anatomia e la chimica del cervello. La corteccia occipitale di ratti accecati o mantenuti completamente al buio aumentava meno di peso della corteccia occipitale di animali allevati in condizioni standard con un normale ciclo luce-buio; tuttavia la privazione della vista non impediva il verificarsi dell'effetto sopra descritto.

Sebbene le differenze cerebrali indotte dall'ambiente non siano grandi, noi pensiamo che si verifichino realmente. Quando gli esperimenti sono ripetuti, vengono ripetutamente riscontrate le stesse differenze. Per esempio, fra il 1960 e il 1966 abbiamo ripetuto 16 volte i nostri esperimenti, confrontando gli effetti indotti da un ambiente piú o meno stimolante valendoci dello stesso ceppo di ratti esposti alle condizioni sperimentali in un'età compresa fra i 25 e i 105 giorni. Ebbene, tutte le esperienze hanno confermato negli animali esposti a un ambiente stimolante un maggior peso della corteccia occipitale. 12 prove su 16 hanno fornito una significatività dello 0,05. Questo vuol dire che per ognuno dei 12 esperimenti la probabilità che la differenza sia dovuta al caso o alla variabilità biologica è minore di 1 a 20. Per il peso dell'intera corteccia cerebrale, 13 esperimenti su 16 hanno dimostrato differenze significative (*si veda l'illustrazione in alto nella pagina seguente*).

L'effetto piú costante dell'esperienza sul cervello che noi abbiamo trovato è il rapporto fra il peso della corteccia e il peso del resto del cervello. Si può verificare che la corteccia aumenta di peso rapidamente per effetto di un ambiente stimolante, mentre il peso della massa subcorticale cambia ben poco. Inoltre, poiché i ratti di taglia maggiore tendono ad avere sia una corteccia che una subcorteccia piú pesante rispetto a ratti di taglia minore, il rapporto fra la corteccia e il resto del cer-

Le differenze di peso fra il cervello di ratti allevati in ambienti stimolanti e quello di ratti tenuti in ambienti non stimolanti sono state verificate in 16 esperimenti successivi fra i 1960 e il 1969, per un periodo di 80 giorni, utilizzando ratti dello stesso ceppo. In tre ripetizioni, le differenze di peso della corteccia occipitale furono significative con un indice di 0,01 (*in rosso*), nove con un indice di 0,05 (*in rosa*), mentre quattro non risultarono significativi (*in tratteggio*). Il rapporto tra il peso della corteccia e quello del resto del cervello si è dimostrato la misura piú attendibile, con 14 casi su 16 aventi un indice di 0,01.

vello tende ad annullare l'influenza del peso corporeo. Per animali di determinato ceppo, sesso, età e ambiente il rapporto corteccia/subcorteccia tende a essere lo stesso anche quando gli animali hanno diverso peso corporeo. Quando l'ambiente è tale che la corteccia aumenta, il rapporto corteccia/subcorteccia rivela il cambiamento in modo molto chiaro a attendibile. Su questo parametro 14 esperimenti su 16 hanno avuto un indice di significatività dello 0,01.

Uno dei problemi maggiori per misurare gli effetti dell'esperienza sul cervello è quello di trovare un'appropriata base di riferimento. All'inizio abbiamo scelto come base di riferimento le condizioni standard alle quali vengono mantenuti gli animali in laboratorio, cosí come hanno fatto la maggior parte degli altri ricercatori. Il rapporto fra il peso della corteccia e quello della parte subcorticale del cervello nei ratti tenuti in ambienti stimolanti è maggiore che nei ratti tenuti in condizioni ambientali standard. Quest'ultimo rapporto, a sua volta, è maggiore rispetto a quello di animali tenuti in ambienti non stimolanti. Quando si prende in considerazione lo spessore della corteccia, gli effetti ambientali sono verificabili in regioni diverse della corteccia.

Supponiamo che l'ambiente naturale in cui gli animali si sono sviluppati sia preso come base di riferimento. Confrontato con gli ambienti di laboratorio, anche quelli stimolanti, un ambiente naturale può essere ben piú ricco di esperienze. Per animali di laboratorio geneticamente omogenei, tuttavia, non è ben chiaro che cosa sia un ambiente naturale. Ratti e topi di laboratorio sono stati tenuti per piú di 100 generazioni in ambienti protetti, e i sistematici reincroci hanno reso il loro patrimonio genetico ben diverso da quello naturale. Per questa ragione abbiamo cominciato a studiare un topo selvatico: il topo dai piedi bianchi (*Peromyscus*). Questi topi vengono catturati nell'area di San Francisco e portati nel nostro laboratorio; alcuni sono tenuti in condizioni quasi naturali in una stazione sperimentale all'aperto, altri sono tenuti nelle gabbie del laboratorio. La ricerca con questi animali è ancora in corso, ma stiamo studiando all'aperto anche ratti di laboratorio. Abbiamo verificato che i ratti di laboratorio vivono benissimo all'aperto anche quando l'inverno è umido e la temperatura scende a zero, purché abbiano sufficiente cibo. Quando il terreno non è troppo bagnato, i ratti si scavano delle tane, cosa che i loro progenitori non hanno fatto per 100 generazioni. In tutti gli otto esperimenti da noi effettuati, i ratti tenuti all'aperto per un mese presentavano uno sviluppo cerebrale maggiore rispetto a quello raggiunto dagli animali tenuti in un ambiente artificialmente stimolante. Questo vuol dire che qualunque ambiente artificiale è sempre piú povero di stimoli di un ambiente naturale.

Può darsi che i cambiamenti cerebrali che noi abbiamo trovato non siano il risultato dell'apprendimento e della memoria, bensí siano attribuibili ad altri aspetti delle condizioni sperimentali, come potrebbero essere le manipolazioni cui gli animali di laboratorio sono inevitabilmente sottoposti, o gli stress altrettanto inevitabili nel corso delle ricerche, oppure ancora a un diverso andamento dei processi di maturazione. Per esempio, è noto che la semplice manipolazione dei ratti, specialmente quelli giovani, determina un aumento di peso delle loro ghiandole surrenali. I ratti allevati in un ambiente stimolante subiscono una quotidiana manipolazione in quanto vengono allontanati dalla loro gabbia quando vengono sostituiti gli oggetti di giuoco, mentre i ratti tenuti in un ambiente privo di stimoli vengono presi in mano una sola volta alla settimana per essere pesati.

Qualche anno fa abbiamo controllato gli effetti sul cervello della manipolazione. Alcuni ratti vennero manipolati per diversi minuti ogni giorno, per 30 o 60 giorni, mentre altri animali provenienti dalle stesse figliate non vennero mai toccati. Non riscontrammo alcuna differenza, né di peso né di attività enzimatica, nei cervelli dei ratti manipolati rispetto a quelli mai toccati. Piú recentemente abbiamo effettuato un controllo su ratti tenuti in ambiente stimolante e ratti tenuti in ambiente privo di stimoli: pur manipolando entrambi i gruppi una volta al giorno, riscontrammo le solite differenze cerebrali.

Lo stress poteva essere un'altra possibile causa di modificazioni cerebrali. I ratti tenuti in ambienti privi di stimoli potevano aver sofferto da « stress da isolamento », mentre i ratti allevati in ambienti stimolanti potevano aver sofferto per un « sovraccarico di informazioni ». Per verificare questa possibilità Walter H. Riege sottopose alcuni ratti a una quotidiana routine stressante. I ratti venivano fatti rotolare brevemente in un tamburo rotante, oppure venivano colpiti con una leggera scossa elettrica. Lo stress produsse un aumento significativo del peso delle ghiandole surrenali, ma non modificò in alcun modo i parametri cerebrali da noi utilizzati. Lo stress, cioè, non è causa dei cambiamenti cerebrali da noi rilevati.

Era possibile che le esperienze stimolanti accelerassero semplicemente la maturazione dei ratti, mentre l'isolamento poteva ritardarla. Questo sospetto era giustificato dal fatto che alcuni dei cambiamenti cerebrali da noi osservati andavano nella stessa direzione di quelli che si verificano nella normale maturazione. Cambiamenti nello spessore della corteccia cerebrale e certe altre modificazioni che risultano dall'essere stato tenuto in un ambiente stimolante si sviluppano in maniera diversa rispetto alla crescita normale. Lo spessore corticale di una colonia standard di ratti raggiunge il suo massimo 25 giorni dopo la nascita per diminuire successivamente con l'età, mentre un'esperienza stimolante determina un aumento dello spessore della corteccia anche in animali di un anno di età. Di fatto, Riege ha trovato che un ambiente arricchito può determinare un aumento del peso del cervello sia in ratti maturi che in ratti giovani, sebbene il ratto adulto richieda un piú lungo periodo di stimolazione ambientale per esprimere l'effetto massimo.

L'effetto dell'ambiente arricchito su ratti molto giovani è stato studiato da Dennis Malkasian. Egli mise gruppi di tre cuccioli di sei giorni con la loro madre in gabbie prive di attrezzature oppure in gabbie fornite di oggetti per giocare. A intervalli di 14, 19 e 28 giorni venivano prelevati i cervelli per l'esame anatomico. A ogni età i cuccioli tenuti nelle gabbie attrezzate presentavano uno spessore della corteccia cerebrale maggiore rispetto ai cuccioli che non erano stati tenuti nelle gabbie non attrezzate, e in alcune parti della corteccia le differenze erano maggiori di quelle trovate in ricerche con ratti esaminati dopo il divezzamento.

Quando pubblicammo per la prima volta i risultati dei nostri esperimenti, altri ricercatori dimostrarono un comprensibile scetticismo giacché mai prima d'allora era stato dimostrato alcun effetto dell'esperienza sul cervello. Dopo che i nostri risultati furono ottenuti ripetutamente, alcuni ricercatori cominciarono a pensare che il cervello potesse essere cosí plastico da venire modificato da qualsiasi trattamento, tenendo semplicemente, per esempio, un ratto per 15 minuti al giorno in un qualsiasi dispositivo diverso dalla sua gabbia. In realtà questo non accade; sebbene cambiamenti cerebrali possano venire indotti con maggiore facilità di quanto noi all'inizio non si supponesse, una moderata esperienza è pur sempre necessaria. Recentemente abbiamo dimostrato che due ore al giorno di esperienza stimolante, per un periodo di 30 giorni, sono sufficienti per determinare i tipici cambiamenti nel peso del cervello di cui prima si è detto. D'altra parte, tenere due ore al giorno un gruppo di 12 ratti in una gabbia spaziosa del tutto priva di attrezzature per un periodo di 30 giorni non comporta alcun cambiamento significativo nei parametri cerebrali da noi studiati. Inoltre, mantenere due ore al giorno ratti isolati in gabbie spaziose e fornite di attrezzature per giocare non basta, probabilmente perché il ratto isolato non gioca molto con gli oggetti e tende a riposare o a curarsi soltanto di se stesso. L'ambiente arricchito produrrà cambiamenti cerebrali nel ratto isolato soltanto se l'animale viene stimolato a reagire agli oggetti. Questo può essere ottenuto somministrando al ratto una dose moderata di un farmaco eccitante o mettendolo nell'ambiente stimolante durante la « fase buia » del suo ciclo quotidiano (i ratti sono animali notturni). Un esperimento recente ha dimostrato che i cambiamenti cerebrali possono essere determinati anche mettendo il ratto nell'ambiente stimolante dopo diverse ore di digiuno e sistemando delle piccole palline di cibo in mezzo agli oggetti.

Senza dubbio molti aspetti dell'anatomia e della chimica cerebrale vengono modificati dall'esperienza. Alcuni dei nostri tentativi piú recenti sono stati indirizzati verso la determinazione delle modificazioni che si verificano a livello sinaptico nella corteccia occipitale, una regione del cervello che, come abbiamo visto, sembra subire modificazioni relativamente grandi attribuibili all'esperienza in un ambiente stimolante. Da qualche anno Albert Globus dell'Università di California a Irvine, si è messo a contare il numero delle ramificazioni dendritiche nelle sezioni di cervello prelevate da ratti che sono stati esposti nel nostro laboratorio ad ambienti piú o meno stimolanti. La maggior parte dei contatti sinaptici fra le cellule nervose della corteccia avvengono sui dendriti della cellula ricevente o sulle loro ramificazioni (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina seguente*). Globus effettuò i suoi conteggi sulle cellule piramidali della corteccia. Egli ha trovato che gli animali esposti ad ambienti ricchi di stimoli presentano dendriti, particolarmente quelli basali, con ramificazioni maggiori di quelle degli animali esposti ad ambienti poveri di stimoli.

Una visione ancor piú dettagliata delle modificazioni che intervengono nelle giunzioni sinaptiche è risultata da una ricerca che abbiamo fatto in collaborazione con Kjeld Møllgaard dell'Università di Copenaghen, che ha trascorso un anno nel nostro laboratorio. Egli preparava microfotografie elettroniche da sezioni cerebrali prelevate dal terzo strato della corteccia di ratti. Misure delle giunzioni sinaptiche hanno rivelato che ratti tenuti in ambienti stimolanti presentano giunzioni con sezioni trasversali superiori in media di circa il 50 per cento rispetto a quelle di animali tenuti in ambienti poveri di stimoli. Questi ultimi tuttavia avevano un numero maggiore di sinapsi per unità d'area (*si veda l'illustrazione a pagina 29*).

Anche William T. Greenough, Roger West e T. Blaise Fleischmann dell'Università dell'Illinois hanno verificato che vi sono giunzioni sinaptiche aumentate nei ratti con esperienza arricchita. Qualche altro ricercatore ha tro-

vato che le aumentate dimensioni delle sinapsi si accompagnano con una diminuzione del loro numero, mentre quando le dimensioni delle sinapsi diminuiscono il loro numero aumenta. Sembra che la memoria o l'apprendimento possa essere codificato nel cervello o mediante un aumento selettivo dei contatti fra le cellule nervose o mediante una rimozione selettiva dei contatti e che entrambi i processi possano procedere contemporaneamente.

Un ambiente piú o meno stimolante può alterare la capacità di apprendere? Sebbene alcune ricerche suggeriscano che l'esperienza in un ambiente ricco di stimoli di solito aumenta il susseguente apprendimento, gli effetti sono spesso di breve durata. Il risultato dipende da molti fattori, per esempio la tecnica di misura dell'apprendimento utilizzata dall'operatore, l'età alla quale l'esperienza viene effettuata e il tipo di lezione che viene appresa. Stimoli precoci possono potenziare l'apprendimento successivo di un tipo di lezione, ma non avere effetto alcuno su un'altra lezione e di fatto indebolire l'apprendimento di una terza. Forse dovremmo considerare come abbastanza limitata la possibilità di trasferire la capacità di apprendere tra tipi di comportamento fra loro completamente differenti. E neppure dovremmo aspettarci che l'esperienza in un ambiente stimolante possa portare a un aumento delle capacità nel loro complesso; ogni ambiente è specifico e cosí pure ogni capacità. Harry F. Harlow dell'Università del Wisconsin ha dimostrato che una precoce esposizione a vari stimoli può provocare nelle scimmie l'effetto deleterio di fissare forme infantili di comportamento; tali scimmie possono non raggiungere mai le efficienti prestazioni dell'animale adulto, prestazioni che invece avrebbero raggiunto se non fossero state sottoposte a un troppo precoce addestramento. Ancora una volta è necessario rilevare che anche questo risultato è specifico e che una sua generalizzazione richiede molta cautela.

Un addestramento formale nei ratti (come insegnare a premere una leva in risposta a un segnale, oppure a percorrere un labirinto) produce modificazioni nell'anatomia e nella chimica cerebrale e sembra che il tipo di addestramento determini il tipo delle modificazioni. Victor Federov e i suoi collaboratori dell'Istituto Pavlov nei pressi di Leningrado hanno trovato nei ratti cambiamenti nel peso del cervello e nella attività dell'acetilcolinesterasi e della colinesterasi susseguenti ad addestramento prolungato, ma la forma delle modificazioni è diversa da quella che abbiamo verificata noi variando tipo di ambiente. Nel nostro laboratorio abbiamo per un mese e piú impartito quotidianamente un addestramento formale a dei ratti sia mediante dispositivi che condizionano l'animale sia in una serie di labirinti e abbiamo trovato dei cambiamenti nel peso del cervello e negli enzimi cerebrali. Questi cambiamenti, tuttavia, furono piuttosto piccoli e inoltre avevano caratteristiche diverse da quelli indotti da esperienze ambientali. Chiaramente questo è un problema che richiede ulteriori ricerche.

Le giunzioni sinaptiche fra cellule nervose possono stabilirsi fra assone e «spina dendritica» o fra assone e dendrite. Le vescicole contengono un mediatore chimico che viene liberato quando un segnale elettrico lungo l'assone raggiunge il bottone terminale. Il mediatore si propaga attraverso lo spazio sinaptico e stimola nel dendrite i siti recettori postsinaptici. La dimensione della membrana è un indicatore dell'attività sinaptica.

L'effetto di ambienti sperimentali sul cervello degli animali è stato qualche volta chiamato in causa in relazione ai problemi dell'educazione umana. A questo proposito vorremmo richiamare a una certa cautela. È già difficile estrapolare i risultati di un esperimento con ratti tenuti in determinate condizioni sperimentali al comportamento di ratti in altre condizioni, ed è quindi ancor piú rischioso estrapolare da un ratto a un topo, a una scimmia, a un uomo. Generalmente abbiamo trovato modificazioni cerebrali similari come effetto dell'esperienza in diverse specie di roditori e ciò sembra aver alimentato la possibilità che risultati simili possano venire ottenuti nei carnivori e nei primati, compreso l'uomo. Soltanto ulteriori ricerche potranno dimostrare se ciò è possibile o no. La ricerca sugli animali solleva quesiti e consente di verificare concetti e tecniche, alcuni dei quali possono in un secondo tempo dimostrarsi utili nella ricerca sugli esseri umani.

Se questa ricerca conduce a comprendere come i ricordi vengono immagazzinati nel cervello, essa avrà ovvie implicazioni negli studi sulle condizioni che favoriscono l'apprendimento e la memoria e quindi anche sulle condizioni che rendono meno efficiente l'apprendere e che contribuiscono al decadimento della memoria. Fra le condizioni sfavorevoli che sono di grande rilevanza sociale dobbiamo contare il ritardo mentale e il declino senile della capacità di fissare nuovi ricordi. Uno spiraglio verso la prevenzione o il miglioramento di queste condizioni potrebbero essere di grande valore sociale. Consideriamo ora due altri settori ai quali possono essere estese le ricerche sulla plasticità cerebrale. Uno di questi settori concerne gli effetti della malnutrizione sullo sviluppo del cervello e dell'intelligenza. Alcuni ricercatori, come R. H. Barnes e David A. Levitsky della Graduate School of Nutrition della Cornell University, hanno avanzato la tesi che certi effetti della malnutrizione siano di fatto effetti secondari di un impoverimento ambientale. Poiché uno dei principali effetti della malnutrizione è quello di rendere le persone o gli animali apatici e non reattivi all'ambiente, i soggetti malnutriti soffrono anche di una carenza di stimolazioni. Questa potrebbe essere la causa diretta di alcuni dei sintomi solitamente associati con la malnutrizione. Ricerche in corso suggeriscono che alcuni degli effetti della malnutrizione possono venire combattuti mediante programmi di stimolazione ambientale o invece aumentati mediante l'impoverimento ambientale.

Un altro utile risultato delle nostre ricerche potrebbe essere quello di stimolare un incremento dei lavori per stabilire i rapporti fra esperienza e anatomia del cervello nell'uomo.

Questo è stato un tema di qualche interesse sul finire del XIX secolo. Per esempio, nel 1892 venne pubblicato il rapporto di un esame anatomico postmortem del cervello di una sordomuta, Laura Bridgman. Si rilevò che la parte della corteccia coinvolta nei processi visivi e auditivi si presentava sottile e priva di quelle circonvoluzioni che sono caratteristiche del cervello umano. Al contrario, la regione della corteccia deputata al senso del tatto aveva un aspetto normale. Sarebbe interessante vedere se tali risultati possono essere generalizzati mediante uno studio su larga scala di cervelli di persone prive di uno o piú sensi. Potrebbe essere ancor piú interessante indagare se l'impiego intensivo di un senso conduce a uno sviluppo superiore al normale della regione corticale associata a quel senso. I musicisti, per esempio, non potrebbero aver sviluppato in modo particolare la regione auditiva della corteccia?

Il cervello umano, per effetto della specializzazione dei due emisferi cerebrali, sembra piú adatto dei cervelli animali a fornire una risposta a queste domande. Le parole sono analizzate nella regione auditiva dell'emisfero cerebrale di sinistra, mentre la musica viene analizzata nelle regione auditiva dell'emisfero destro. (In poche persone, queste funzioni emisferiche sono invertite.) Lo sviluppo relativo di regioni diverse nello stesso cervello potrebbe venire misurato, cosicché i soggetti esaminati potrebbero eseguire il controllo di se stessi. In ricerche recenti Norman Geschwind e Walter Levitsky della Scuola di Medicina di Harvard hanno scoperto che il 65 per cento dei cervelli umani da loro esaminati presentavano un maggiore sviluppo anatomico dell'area auditiva dell'emisfero sinistro, l'11 per cento di quella dell'emisfero destro e il 24 per cento un eguale sviluppo nei due emisferi. D'altra parte, controlli fisiologici e del comportamento hanno dimostrato che il 96 per cento delle persone esaminate presentano una dominanza del centro del linguaggio articolato nell'emisfero sinistro e presumibilmente presentano da quella parte un maggiore sviluppo dell'area auditiva. È possibile che le persone con un'educazione musicale spieghino la maggior parte dei casi in cui le dimensioni dell'area auditiva di destra è uguale o superiore a quella di sinistra? Per stabilirlo basterà misurare un numero sufficiente di cervelli di persone di capacità o inabilità note. Di fatto, questo programma fu proposto 100 anni fa da Broca, ma le tecniche allora disponibili non erano adeguate alla realizzazione di un tale progetto. Oggi i risultati dei nostri studi sugli animali possono servire da guida e gli scienziati possono cercare in modo piú efficace le modificazioni anatomiche e chimiche del cervello umano determinate dall'esperienza e dall'apprendimento.

Microfotografia elettronica di una sezione cerebrale ingrandita 37 000 volte prelevata dalla regione occipitale della corteccia. Nella rappresentazione schematica in basso si possono identificare alcuni dei principali componenti cellulari. Gli ispessimenti postsinaptici sono indicati con frecce (*a*). Il numero delle giunzioni sinaptiche è risultato superiore, anche se esse erano piú piccole, nei ratti allevati in ambienti privi di stimoli rispetto a quello dei ratti allevati in ambienti stimolanti; tuttavia i ratti con esperienze arricchite possiedono giunzioni sinaptiche piú grandi del 50 per cento circa.

Radioastronomia intercontinentale

La struttura dei quasar e delle altre radiosorgenti viene studiata con interferometri costituiti da radiotelescopi separati da distanze che si avvicinano al diametro terrestre

di K.I. Kellermann

Fino a poco tempo fa le immagini fornite dai radiotelescopi mancavano di dettagli rispetto a quelle date dai telescopi ottici e ciò è dovuto al fatto che il potere risolutivo di un telescopio cresce col rapporto tra apertura e lunghezza d'onda del segnale in esame. Poiché la lunghezza delle onde radio è di circa un milione di volte superiore a quella delle onde luminose, si è generalmente accettata l'idea che i radiotelescopi abbiano una risoluzione angolare inferiore a quella dei telescopi ottici.

In realtà ciò non corrisponde al vero per due ragioni. Innanzi tutto il potere risolutivo dei grandi telescopi ottici è limitato non tanto dalle loro dimensioni quanto dalle irregolarità dell'atmosfera terrestre. Tale limite è di circa un secondo di arco, solo un centinaio di volte superiore a quello dell'occhio umano. Alle frequenze radio, invece, le fluttuazioni nella lunghezza del cammino che il segnale percorre nell'atmosfera sono piccole in confronto alla lunghezza delle onde radio, per cui l'effetto delle irregolarità atmosferiche è molto meno importante. In secondo luogo sia il segnale radio sia quello ottico devono essere coerenti o in fase su tutta l'estensione del telescopio ed è molto piú facile trattare onde radio coerenti che segnali luminosi coerenti, per cui i radiotelescopi possono lavorare molto piú vicino di quelli ottici al limite teorico di risoluzione.

La forma piú comune di radiotelescopio è quella di un paraboloide mobile con apertura o diametro generalmente compreso tra 10 e 100 metri. Sebbene la risoluzione, per una data apertura, cresca al diminuire della lunghezza d'onda, il rendimento comincia a peggiorare sensibilmente quando la lunghezza d'onda si avvicina alle dimensioni delle imperfezioni della struttura dell'antenna. Siccome, per ovvie ragioni, le antenne piú grandi hanno superfici meno precise, la migliore risoluzione ottenuta con antenne a paraboloide non dipende molto dalla lunghezza d'onda ed è circa 1 minuto di arco. Sebbene sia possibile costruire grandi antenne piú precise, non sembra probabile che si possano ottenere in questo modo risoluzioni molto migliori di 1 minuto di arco. Perciò i radioastronomi hanno rivolto la loro attenzione agli interferometri: due antenne relativamente piccole si comportano, in questo caso, come le estremità opposte di un unico enorme radiotelescopio.

Gli interferometri che lavorano su onde luminose hanno trovato impiego in astronomia fin dal 1920, quando A. A. Michelson e F. G. Pease impiegarono uno strumento con due specchi distanti fino a 6 metri per misurare il diametro di alcune stelle. Nell'interferometro di Michelson un'onda luminosa viene raccolta da due specchi distinti che riflettono due fasci in un punto comune, dove si combinano (*si veda la figura a pag. 32*). Se si rende il percorso di un fascio leggermente piú lungo o piú corto di quello dell'altro, le onde luminose di un fascio risulteranno sfasate rispetto a quelle dell'altro. Quando i due fasci si combinano i due treni di onde interferiscono sommandosi o distruggendosi a vicenda: osservando il fascio risultante si vede una configurazione di « frange » alternativamente chiare e scure. In un interferometro radio il fronte di un'onda che avanza cade su due radiotelescopi diversi e i segnali sono convogliati in un punto comune e confrontati elettricamente.

I tentativi di estendere gli interferometri ottici a grandi basi per ottenere un potere risolutivo piú alto, sono rimasti infruttuosi prima di tutto perché è difficile sia mantenere coerenti le onde luminose di un sistema sia mantenere l'allineamento degli specchi entro una frazione della lunghezza d'onda. Con uno strumento radio diventano molto piú semplici i problemi di trasmissione di segnali da ciascun elemento dell'interferometro a un punto comune. È cosí che si possono usare due o piú antenne radio per ottenere grandi aperture e raggiungere elevate risoluzioni angolari. Con uno strumento di questo tipo si possono determinare non solo forma e dimensioni di radiosorgenti discrete, ma anche la loro esatta posizione nel cielo.

Col crescere della distanza tra gli elementi di un interferometro radio e coi progressi tecnologici che hanno reso possibile lavorare a lunghezze d'onda piú corte, è continuamente migliorata la risoluzione raggiungibile. Sebbene molte radiosorgenti si possano risolvere bene con interferometri che abbiano una base dell'ordine del chilometro e un potere risolutivo dell'ordine del minuto di arco, poco prima del 1960 ci si rese conto che era necessaria una maggiore risoluzione per studiare nei dettagli la struttura di queste sorgenti e per risolvere le sorgenti meno estese.

È ormai generalmente ammesso che l'emissione radio di sorgenti discrete come radiogalassie e quasar sia radiazione di sincrotrone emessa da elettroni che si muovono in deboli campi magnetici cosmici a velocità relativistiche, cioè a velocità prossime a quella della luce. L'energia necessaria per giustificare la potenza irraggiata che si osserva è estremamente grande e il problema dell'origine di questa energia e della sua conversione in particelle relativistiche è stato uno dei piú appassionanti dell'astrofisica moderna (si veda l'articolo *Astrofisica dei raggi cosmici* di V. L. Ginzburg, in « Le Scienze », n. 9, maggio 1969).

Inizialmente le osservazioni di radiogalassie e quasar erano concentrate a lunghezze d'onda relativamente lunghe (vicino al metro), ma col progredire della tecnica delle lunghezze d'onda brevi si è registrato un crescente interesse, particolarmente negli USA e in URSS, per le lunghezze d'onda centimetriche e millimetriche. Oggi si distinguono essenzialmente due tipi di radiosorgenti: uno con estensione angolare maggiore e piú intenso alle lunghezze d'onda maggiori, l'altro relativamente compatto e piú intenso alle lunghezze d'onda piú brevi. È piuttosto sorprendente che non vi sia una relazione semplice tra estensione angolare dell'emissione radio e dell'emissione ottica delle galassie e dei quasar. Le radiosorgenti compatte non sono solo quasar; molte sono state identificate con nuclei di galassie e inoltre molti quasar sono radiosorgenti molto estese.

Le radiosorgenti estese hanno una distribuzione complessa di emissione radio che presenta un'estensione tipica di alcune centinaia di migliaia di anni luce, il che corrisponde a dimensioni angolari comprese tra alcuni secondi e alcuni minuti di arco. Molte di queste « sorgenti estese » sono composte di due o piú componenti separate nello spazio e con dimensioni dell'ordine della metà della distanza che le separa. Nei casi in cui la radiosorgente sia identificata con un oggetto ottico, la galassia o il quasar identificato possono trovarsi o vicino al centro dell'emissione radio o coincidere con una delle componenti radio. Spesso vi sono noduli brillanti di emissione radio sia nel centro della sorgente sia entro una o entrambe le componenti distinte. In almeno un caso – la radiogalassia doppia Cygnus A – ciascuna delle due componenti principali contiene chiaramente entro se stessa una sorgente doppia piú piccola.

Nonostante sia da tutti ammesso che le particelle relativistiche sono espulse da un'esplosione in una qualche origine comune, resta difficile comprendere come le componenti piú piccole possano rimanere intatte dopo essere state scagliate cosí lontano dal punto di origine. Alcuni astrofisici hanno avanzato l'ipotesi che ciò che è stato espulso siano piuttosto oggetti massivi che generano poi particelle ad alta energia *in situ* sia come risultato di esplosioni singole o ripetute sia per un qualche processo continuo di accelerazione.

Le radiosorgenti compatte sono cosí piccole e la loro densità in particelle cosí grande che, poiché le particelle relativistiche non solo assorbono, ma anche emettono radiazione, la sorgente alle grandi lunghezze d'onda diventa opaca alla sua stessa radiazione e quindi può emergere solo poca energia. La frequenza di taglio dell'autoassorbimento dipende solo dalla densità di flusso, dal diametro angolare e (poco) dall'intensità del campo magnetico. Piú piccola è la sorgente e piú breve è la lunghezza d'onda per cui essa diventa opaca.

Poiché le sorgenti compatte sono relativamente deboli alle grandi lunghezze d'onda (a cui furono fatte le prime osservazioni di radiosorgenti extragalattiche), esse rimasero praticamente inosservate per molti anni finché non entrarono in uso ricevitori sensibili alle lunghezze d'onda brevi. A quell'epoca, come risultato della scoperta di radiosorgenti opache alle lunghezze d'onda decimetriche e anche centimetriche, ci si rese conto che per valori « ragionevoli » dell'intensità del campo magnetico (circa 10^{-4} gauss) le dimensioni angolari delle sorgenti opache dovevano essere veramente piccole, probabilmente dell'ordine del centesimo o del millesimo di secondo d'arco, e quindi di vari ordini di grandezza inferiori al potere risolutivo di qualsiasi radiotelescopio esistente.

Un'ulteriore prova indiretta di queste piccole dimensioni delle radiosorgenti opache deriva dalla scoperta di William A. Dent, nel 1965, che la radioemissione del quasar 3C 273 è variabile. Si riteneva comunemente che la radiazione proveniente da un qualsiasi oggetto non potesse variare in una scala di tempo sensibilmente inferiore al tempo richiesto alla luce per attraversare la sorgente stessa. In caso contrario, infatti, le variazioni apparenti sarebbero state attenuate dalle differenze tra i tempi di propagazione dei segnali provenienti dalle diverse parti della sorgente. Poiché 3C 273 presentava sensibili variazioni in un intervallo di tempo di un anno, si stimò che le dimensioni della componente variabile fossero dell'ordine di un anno luce o meno. Lo spostamento verso il rosso misurato su 3C 273 corrisponde a una velocità di recessione pari a circa un terzo della velocità della luce. La legge di espansione di Hubble, che lega lo spostamento verso il rosso alla distanza, dà, per questo oggetto una distanza di circa 1,5 miliardi di anni luce, corrispondenti a una dimensione angolare inferiore a 0,001 secondi di arco.

Ulteriori studi sull'emissione radio variabile hanno dimostrato che il fenomeno non è limitato ai quasar, ma avviene anche nei nuclei di alcune galassie e le variazioni osservate non presentano alcuna periodicità analoga a quella che si riscontra in molte comuni stelle variabili. Sembra piuttosto che le variazioni abbiano in generale la forma di grandi esplosioni (*outburst*) che possono comparire prima alle brevi lunghezze d'onda e poi si propagano con ampiezza ridotta verso le lunghezze d'onda maggiori. La tipica scala di tempo per un singolo outburst varia da qualche settimana a qualche anno e in alcune sorgenti l'intervallo tra gli outburst è inferiore alla durata di un singolo outburst. Dalle variazioni osservate si è concluso che nei nuclei delle galassie e nei quasar vi sono outburst ripetuti, che producono una nube di particelle relativistiche che si espande e irraggia per processo di sincrotrone. Sembra che ogni nube si produca in un intervallo di pochi mesi e in uno spazio di volume inferiore a pochi mesi luce di raggio. Inizialmente la nube è opaca alle grandi lunghezze d'onda; via via che si espande, all'aumentare della superficie radiante, aumenta l'energia che sfugge: nello stesso tempo diminuisce l'intensità del campo magnetico e gli elettroni perdono energia in seguito all'espansione. Quando la nube diventa cosí rarefatta da essere trasparente, allora l'intensità diminuisce col passare del tempo prima alle brevi lunghezze d'onda, e poi a quelle piú lunghe. Al momento di un outburst sembra che il campo magnetico nella nube sia dell'ordine di un gauss, cioè circa uguale al campo magnetico sulla superficie terrestre. L'espansione della nube fa sí che l'intensità del campo diminuisca rapidamente fino a raggiungere circa 10^{-4} gauss, dopo di che sembra che le particelle relativistiche si propaghino attraverso un campo magnetico fisso. Si ritiene che la produzione e diffusione continua di particelle relativistiche da centri compatti porti alla creazione delle radiosorgenti dalle dimensioni a noi familiari.

Rimane però senza risposta la domanda fondamentale qual è la fonte di energia e come questa energia si converte in particelle relativistiche. Alcuni astronomi ritengono che abbiamo qui raggiunto i limiti della fisica convenzionale e che solo teorie del tutto nuove potranno spiegare l'emissione apparentemente fantastica di energia dei nuclei galattici e dei quasar. È chiaro che la soluzione del problema sta nella capacità di studiare abbastanza a fondo questi oggetti incredibilmente piccoli in modo da svelare il complesso fenomeno che provoca l'intensa emissione radio. Fino a pochi anni fa però la speranza di ottenere la risoluzione angolare richiesta superava i sogni piú ottimistici dei radioastronomi poiché richiedeva per gli interferome-

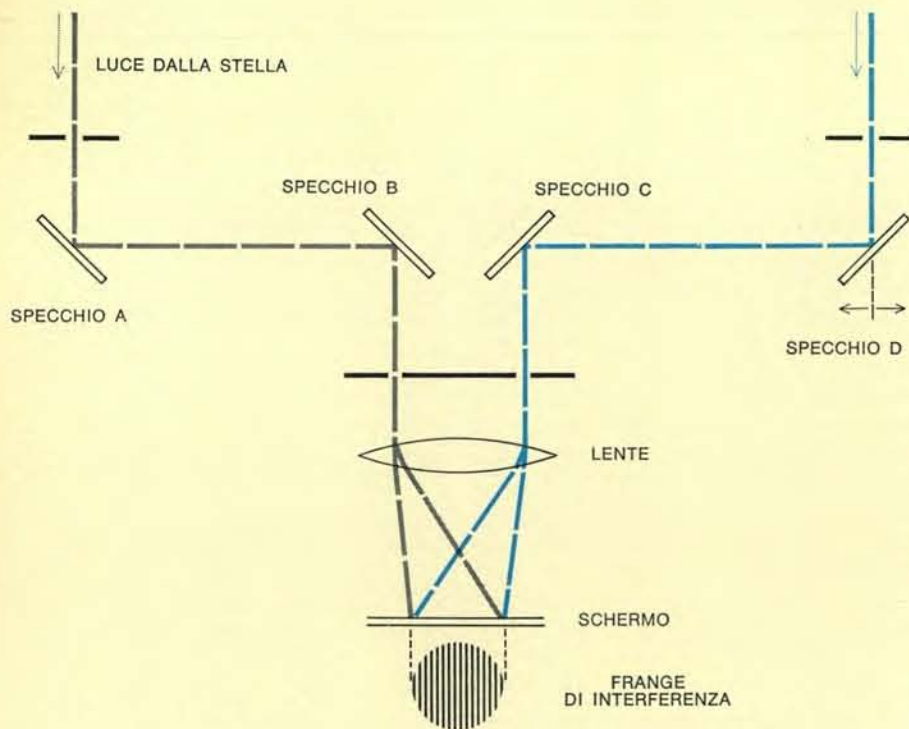
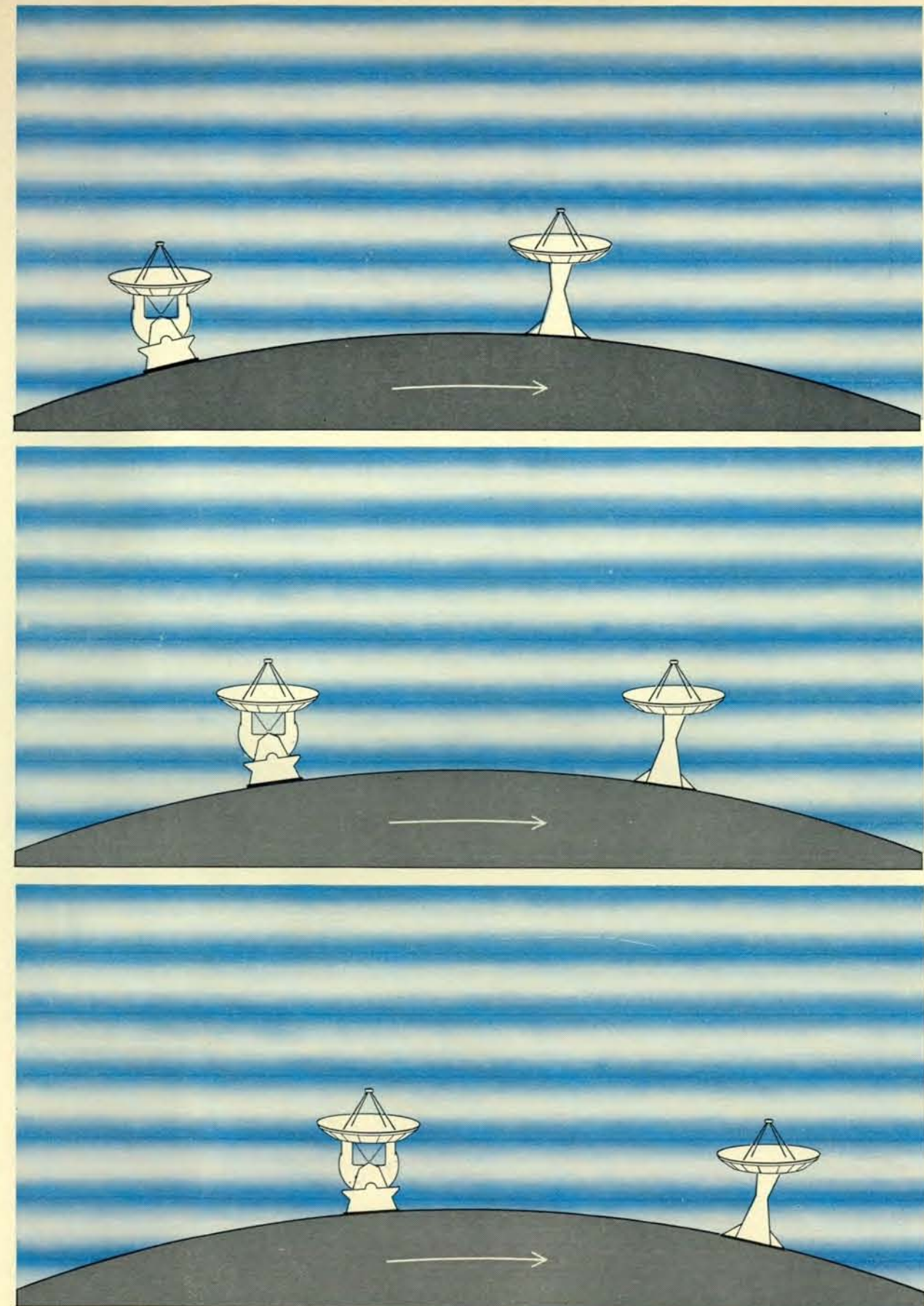
tri basi che sembravano troppo lunghe.

Non era possibile realizzare basi piú lunghe per gli interferometri convenzionali, per il grande costo dei cavi tra gli elementi dell'interferometro stesso. Si è ottenuto un notevole miglioramento nella risoluzione sostituendo i cavi di connessione con ponti radio a microonde. Questa tecnica fu usata per la prima volta dai radioastronomi australiani e inglesi per ottenere basi di lunghezza superiore ai 100 chilometri e risoluzione superiore a un secondo di arco. Per risolvere le compatte sorgenti variabili di dimensioni presumibili di circa 0,001 secondi, erano però necessarie linee di base paragonabili alle dimensioni terrestri. Non si poteva sperare di realizzare ulteriori miglioramenti nella risoluzione con interferometri a collegamento radio; i ponti radio a microonde possono realizzare solo collegamenti « a vista » e l'installazione di un gran numero di stazioni ripetitrici è, almeno per ora, costosa e tecnicamente complessa.

Per molti anni i radioastronomi hanno discusso la possibilità di eliminare completamente i collegamenti elettrici diretti tra gli elementi di un interferometro mediante la registrazione dei segnali su nastro magnetico all'uscita di ciascuna antenna e il successivo confronto delle due registrazioni. Per ottenere un risultato positivo devono essere soddisfatte due esigenze. La prima è che le registrazioni sui due nastri siano sincronizzate in modo da conoscere con precisione il momento in cui il fronte d'onda viene ricevuto da ciascuna stazione. La precisione per la sincronizzazione temporale è circa il reciproco della larghezza di banda del segnale registrato ossia circa un microsecondo (un milionesimo di secondo) per una larghezza di banda di un megahertz (un milione di cicli al secondo). La seconda esigenza è legata al fatto che i radiotelescopi ricevono segnali di frequenza troppo alta per poter essere registrati direttamente su nastro magnetico. Si devono perciò usare degli oscillatori locali indipendenti per trasformare un segnale che ha una frequenza tipica di vari gigahertz (miliardi di cicli al secondo) in un segnale con una frequenza intermedia molto piú bassa (vicino al megahertz) che possa essere registrata. Se si devono correlare i segnali di frequenza intermedia, gli oscillatori devono restare costanti per tutto il tempo di osservazione. Ciò significa che gli sfasamenti relativi tra i due oscillatori devono mantenersi piccoli per tutto il periodo di osservazione in modo che variazioni di frequenza siano inferiori al reciproco del tempo di registrazione.

Fin dal 1961 è stata presa in esame in URSS la possibilità di interferometri con oscillatore locale indipendente e registrazione su nastro magnetico. A quell'epoca non si disponeva però ancora di standard stabili di frequenza e di registratori a nastro a banda larga necessari per un'alta sensibilità. Un interferometro con registrazione su nastro venne impiegato in pratica per la prima volta in radioastronomia da un gruppo di ricercatori dell'Università della Florida per studiare le dimensioni delle tempeste radio sul pianeta Giove alla frequenza di 18 megahertz. I burst di Giove sono cosí intensi che con un tempo di integrazione notevolmente inferiore al secondo a una larghezza di banda di circa un chilohertz si ottiene una sensibilità sufficiente. Perciò una stabilità di frequenza di una parte su 100 milioni e un tempo di sincronizzazione di un millisecondo bastavano per mantenere la coerenza ai due capi dell'interferometro; la necessaria stabilità di frequenza e il tempo di sincronizzazione venivano forniti dai segnali di tempo della stazione WWV del National Bureau of Standards. Si poté cosí stabilire che le dimensioni delle regioni radioemittenti erano inferiori a 0,1 secondo di arco pari a circa 300 chilometri sulla superficie di Giove. Questa risoluzione è notevolmente superiore alla piú alta risoluzione delle fotografie di Giove alle lunghezze d'onda ottiche.

Per usare interferometri a registrazione su nastro nello studio delle piú deboli emissioni radio delle radiogalassie e dei quasar si dovette attendere che diventassero di uso commerciale gli standard atomici di frequenza e i registratori a nastro ad alta velocità. In quel periodo si svilupparono indipendentemente negli USA e in Canada due sistemi per interferometria con registratore a nastro. Un sistema studiato da un gruppo di ricercatori canadesi del National Research Council e dell'Università di Toronto impiegava i registratori a nastro usati in televisione per registrare i dati su una banda larga quattro megahertz. (Questi registratori sono dello stesso tipo di quelli usati per mostrare la « ripetizione immediata » di un avvenimento sportivo.) Un sistema elaborato dal gruppo americano dell'Osservatorio radioastronomico nazionale e della Cornell University utilizzava invece un normale calcolatore munito di unità a nastro per registrare i dati numerici su una banda di 300 chilohertz. Il sistema canadese, sebbene avesse il vantaggio

LUCE DALLA STELLA
SPECCHIO B
SPECCHIO C
SPECCHIO A
SPECCHIO D
LENTE
SCHERMO
FRANGE DI INTERFERENZA

Interferometro ottico che illustra il principio dell'interferometro radio. La luce proveniente da una sorgente lontana viene riflessa dai due specchi esterni (*A e D*) agli specchi interni (*B e C*) e poi sommata sullo schermo di proiezione. Muovendo uno degli specchi (*D*) si rende leggermente piú lungo il cammino di uno dei due fasci luminosi rispetto all'altro, sfasando le onde luminose rispetto a quelle che percorrono l'altro cammino. Quando i due fasci vengono a sommarsi sullo schermo, interferiscono l'uno con l'altro creando una configurazione di frange interferenziali (*in basso*).

L'interferometro radio sfrutta la rotazione della Terra per variare la distanza che un'emissione radio deve attraversare per raggiungere un radiotelescopio. In un dato istante una cresta del fronte d'onda radio viene raccolta da un telescopio e un incavo dell'onda dall'altro (*in alto*). Le onde saranno sfasate le une rispetto alle altre e si distruggeranno per interferenza. Un po' piú tardi la rotazione della Terra avrà spostato i telescopi in una posizione per cui entrambi riceveranno simultaneamente massimi e minimi dell'onda (*al centro*). Nel disegno è esagerata la rotazione necessaria per cambiare la relazione di fase.

di una maggiore larghezza di banda e perciò una maggiore sensibilità, richiedeva però una speciale e complessa apparecchiatura per sincronizzare i nastri al momento della lettura. Nel sistema americano i dati numerici venivano inseriti in un grande calcolatore che accumulava e correlava le due fonti di dati. All'Osservatorio radioastronomico nazionale, Barry G. Clarke e altri hanno recentemente realizzato un nuovo sistema che usa registratori a nastro televisivi per registrare dati numerici e uno speciale elaboratore per correlare i nastri. In questo modo si conservano sia la grande larghezza di banda sia il vantaggio delle moderne tecniche di elaborazione dei dati numerici.

In questi sistemi si usano standard atomici di frequenza per fornire una precisa sincronizzazione temporale lungo tutte le registrazioni e per mantenere la frequenza dell'oscillatore locale. Sebbene gli orologi atomici diano una registrazione sufficientemente precisa del tempo durante una singola registrazione che può durare anche molte ore, è innanzitutto ovviamente necessario sincronizzare gli orologi nelle diverse località. Si può fare ciò confrontando direttamente i due orologi nella stessa località e poi trasportarne uno in un sito distante (il che spesso presenta inconvenienti), o facendo riferimento a uno degli orologi atomici continuamente sotto controllo negli appositi istituti dei vari paesi o per mezzo dei segnali di navigazione Loran C a disposizione in molte parti del mondo.

Si richiede una sincronizzazione dell'ordine del microsecondo, ma non è necessario che la sincronizzazione iniziale sia cosí precisa perché si possono far girare i nastri piú di una volta con vari ritardi di tempo finché non si trovano le frange di interferenza. Si possono cosí trovare facilmente ritardi di tempo fino a 100 microsecondi; quando compaiono le frange si sincronizzano gli orologi nella misura richiesta fino a una precisione superiore al microsecondo. Con larghezze di banda superiori o con osservazioni fatte a diverse frequenze per sintetizzare una grande larghezza di banda efficace, è possibile sincronizzare in questo modo orologi lontani con una precisione di pochi nanosecondi (miliardesimi di secondo).

Gli standard atomici di frequenza usati nei primi esperimenti erano gli standard a vapori di rubidio allora sul mercato, con una stabilità di frequenza relativa di una parte su 100 miliardi. I maser all'idrogeno hanno una stabilità da 100 a 1000 volte superiore, il che corrisponde all'errore di meno di un microsecondo all'anno. Questi maser hanno però un prezzo elevato, un funzionamento complesso e non sono facili da trasportare. Per quanto gli standard al rubidio siano abbastanza stabili per dare le figure di interferenza e la misura dell'ampiezza, non hanno in genere la stabilità sufficiente per permettere di misurare la fase della figura di interferenza. Sono già state fatte alcune esperienze usando i maser all'idrogeno come standard di frequenza per ottenere una migliore stabilità di fase e si prevede che quando i maser saranno piú facilmente utilizzabili, verranno comunemente impiegati per controllare tempo e frequenza degli interferometri a registrazione su nastro.

Le prime misure su lunga base con interferometri a registrazione su nastro furono eseguite nel 1967 alle lunghezze d'onda di 75, 50 e 18 centimetri su basi che attraversavano il Canada e gli USA e confermarono rapidamente le previste piccole dimensioni di molte radiogalassie e quasar. Nonostante si fosse riusciti a risolvere oggetti le cui dimensioni erano dell'ordine del centesimo di secondo d'arco, ne rimanevano ancora molti altri per i quali erano evidentemente necessarie risoluzioni maggiori.

Le lunghezze di base furono rapidamente estese in una serie di esperimenti di collaborazione intercontinentale nel 1968 e nel 1969 per merito di radioastronomi americani, svedesi e australiani. Sulle basi piú lunghe si ottenne una risoluzione di 0,001 secondi di arco alla lunghezza d'onda di 6 centimetri, ma anche con questa formidabile risoluzione vi erano ancora molte componenti chiaramente non risolte. La base California-Australia era già lunga piú di 10 000 chilometri, piú dell'80 per cento del diametro terrestre, per cui non era possibile un ulteriore incremento significativo della base fisica senza urtare contro il costo esorbitante di stazioni installate nello spazio o sulla Luna.

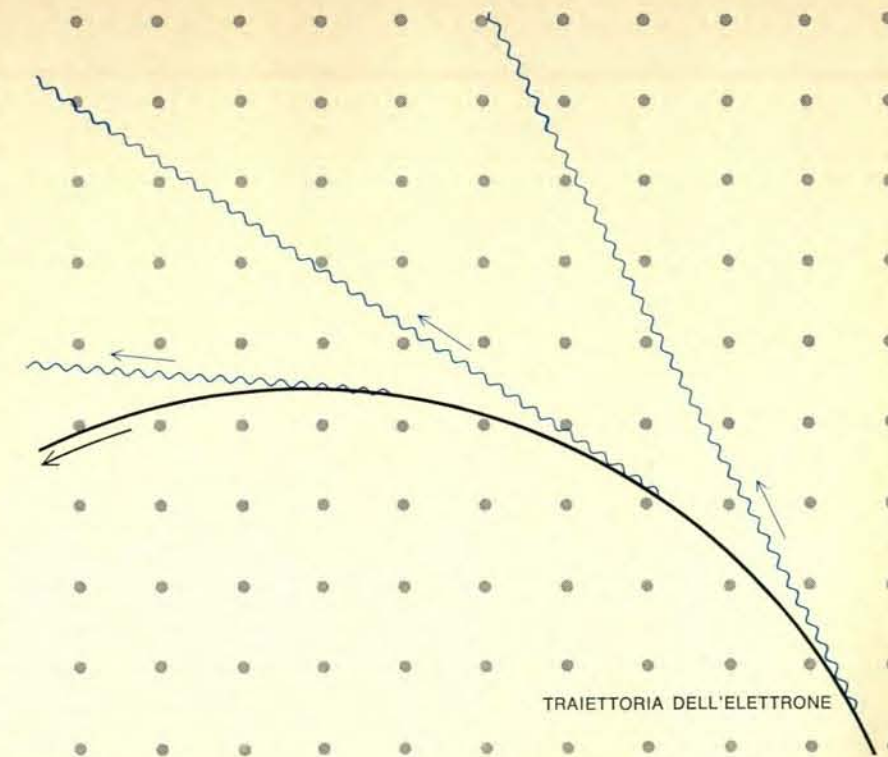
Un'alternativa piú economica e semplice era rappresentata da osservazioni a lunghezza d'onda inferiore. Però al di fuori dell'America del Nord esistevano solo due radiotelescopi adatti a questo scopo e abbastanza grandi da offrire un'adeguata sensibilità per l'interferometria su lunga base e tutti e due si trovavano in URSS.

Carta del mondo che illustra le lunghezze di base interferometriche usate per studi ad alta risoluzione di radiogalassie e quasar. La piú lunga base finora impiegata è quella che si estende per 10 000 chilometri tra Goldstone e Tidbinbilla.

Persino negli esperimenti in collaborazione con le nazioni occidentali, alcuni problemi logistici, come trasporto dei nastri magnetici e di apparecchiature fragili, trattative tra le autorità doganali americane e straniere si erano dimostrati di importanza non inferiore alle considerazioni tecniche. Questi problemi diventavano ancora piú seri nel caso di collaborazione russo-americana poiché vi è uno scambio relativamente scarso di apparecchiature scientifiche e tecniche di un certo rilievo tra queste due nazioni.

La prima collaborazione interferometrica tra USA e URSS fu portata a termine alla fine del 1969. Gli strumenti alle due estremità della base erano l'antenna da 42 metri dell'Osservatorio radioastronomico nazionale di Green Bank nella Virginia occidentale e un nuovo radiotelescopio di precisione di 22 metri sulle sponde del Mar Nero in Crimea. Nella primavera del 1971 fu eseguito un secondo esperimento che comprendeva oltre i telescopi di Green Bank e di Crimea anche il radiotelescopio ultrasensibile di 63 metri di Goldstone in California e il telescopio « Haystack » nel Massachusetts settentrionale. Lo strumento di Goldstone dipende dalla NASA, l'« Haystack » dall'Istituto di Tecnologia del Massachusetts. Piú di venti studiosi di otto istituti di entrambi i paesi parteciparono al secondo esperimento che comprendeva osservazioni sia di nubi interstellari di vapor acqueo sia di radiogalassie e quasar.

I dati ottenuti dalla base Goldstone-Crimea alla lunghezza d'onda di 3,5 centimetri danno la piú alta risoluzione che sia stata finora ottenuta nello studio delle radiogalassie e dei quasar: circa 0,0003 secondi di arco. Si tratta di un angolo veramente molto piccolo, pari all'angolo sotteso dall'altezza dei caratteri di questo articolo visti alla distanza di 2400 chilometri; nel caso di un telescopio ottico che lavori in condizioni ideali alla stessa distanza si può a mala pena distinguere un uomo. La misura delle nubi di vapor acqueo, eseguite a lunghezza d'onda inferiore, danno risoluzioni anche maggiori.

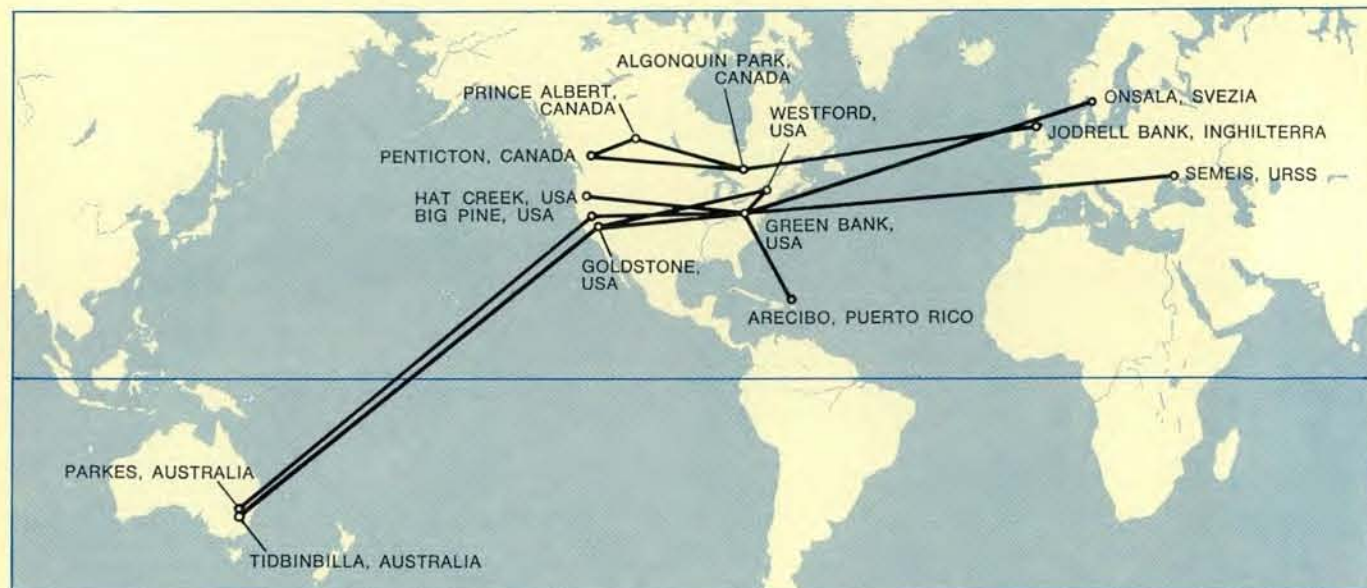
Le piú piccole dimensioni fisiche che siano state misurate direttamente in una radiosorgente extragalattica sono quelle del nucleo della radiogalassia vicina Messier 87; si tratta di una misura angolare di 0,001 secondi di arco corrispondente a dimensioni lineari di solo un quarto di anno luce. Si ritiene che le particelle relativistiche che riempiono l'alone radio che ha ora un'estensione di piú di 100 000 anni luce di diametro siano state prodotte o accelerate in questo nucleo compatto da un'attività continuata o ripetuta nel corso di milioni di anni. Analoghi nuclei radio si trovano in altre galassie a spirale o ellittiche come pure in radiogalassie con intensa emissione.

La radiazione di sincrotrone, che si pensa sia la sorgente dell'emissione radio di radiogalassie e quasar, è creata da elettroni che si muovono lungo traiettorie a spirale a velocità relativistiche (cioè prossime alla velocità della luce) in un campo magnetico. Qui le linee di forza del campo sono perpendicolari alla pagina (*punti grigi*). Gli elettroni si muovono in senso antiorario ed emettono radiazione (*linee ondulate*) nel piano della pagina. La lunghezza d'onda predominante della radiazione di sincrotrone dipende dall'energia dell'elettrone in movimento e dall'intensità del campo magnetico esistente.

Combinando i dati ottenuti con vari esperimenti su lunghe basi si sono cominciati a ottenere i primi modelli schematici della struttura dei nuclei radioemettitori e dei quasar compatti con risoluzioni che superano 0,001 secondi di arco. Questa risoluzione è circa 1000 volte superiore a quella possibile nel dominio ottico, dove quasar e nuclei galattici hanno semplicemente l'aspetto di punti luminosi confusi, e offre per la prima volta la possibilità di studiare nei particolari gli eventi violenti che si verificano in questi oggetti.

Negli interferometri radio convenzionali si possono muovere una o piú antenne lungo distanze fino a qualche chilometro per ottenere il numero di spaziature interferometriche necessarie a ricostruire un'immagine della sorgente. Nell'interferometria ad altissima risoluzione dove le basi si estendono per continenti e oceani, è chiaramente impossibile trasportare grandi antenne. Si sono perciò fatte osservazioni coi radiotelescopi già esistenti in posizioni fisse nelle varie località, restringendo l'intervallo delle lunghezze di base utilizzabili. Questo dà però adito a una considerevole ambiguità nell'interpretazione dettagliata dei dati, permettendo quindi di ottenere solo immagini approssimative.

Si è trovato che le sorgenti maggiormente studiate nei particolari hanno una struttura complessa e non presentano in generale una simmetria circolare. Vi è spesso una gerarchia di dimensioni delle componenti che possono variare da meno di 0,001 secondi d'arco a 0,1 secondi o piú in una stessa radiogalassia o quasar. In generale le componenti piú piccole sono le piú intense alle brevi lunghezze d'onda, risultato previsto dalla teoria dell'emissione sincrotrone. Nel caso in cui le osservazioni diano dimensione angolare, frequenza di taglio spettrale e densità di flusso del picco, si può stimare dalla teoria dell'emissione di sincrotrone l'intensità del campo magnetico che è in genere dell'ordine di 10^{-4} gauss.

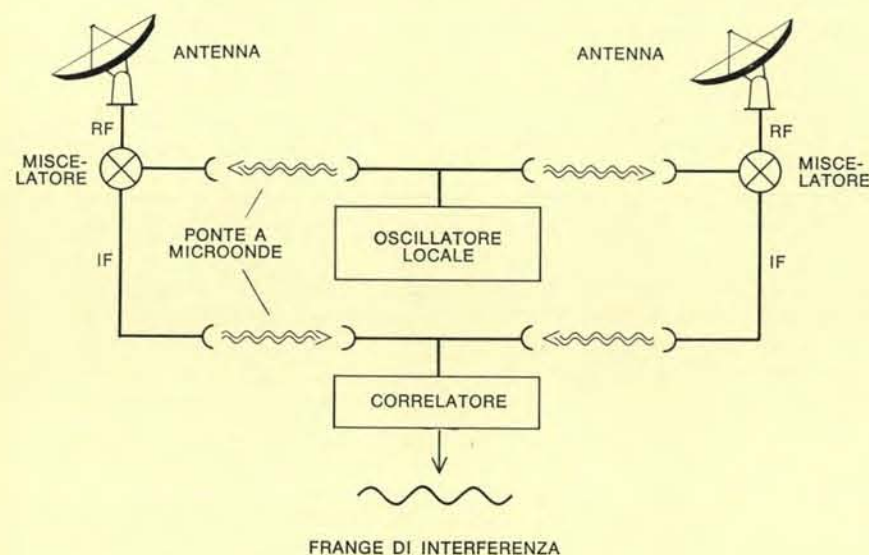
Molte componenti compatte sono spazialmente divise, con una regione vicino al centro di splendore relativamente basso. Sebbene non sia in generale possibile decidere con sicurezza tra struttura anulare ellittica e struttura doppia, sembra che questa seconda ipotesi meglio si accordi coi dati di osser-

vazione. Va notato che questa struttura doppia, caratteristica delle radiogalassie e dei quasar, si osserva per valori angolari compresi tra 0,001 secondi di arco e vari minuti di arco. Ciò corrisponde a valori da uno a 100 000 nelle dimensioni, pari a dimensioni lineari variabili da un anno luce a molte centinaia di migliaia di anni luce.

Sebbene le dimensioni angolari delle componenti individuali misurate e quelle previste dalla frequenza di taglio per autoassorbimento siano in buon accordo col modello dell'emissione di sincrotrone, restano difficili da interpretare le rapide variazioni di intensità e le enormi energie richieste per spiegare la potente radiazione che si osserva in alcuni quasar. Per un certo periodo si è sperato di ottenere una prova piú definitiva della teoria del sincrotrone misurando le variazioni di dimensioni delle sorgenti variabili dato che la teoria prevede una stretta relazione tra la legge con cui variano le dimensioni e quella con cui variano le intensità. Ora dati di questo tipo sono disponibili, ma i risultati lasciano perplessi e sono piú le domande che pongono che le risposte che danno.

Si è avanzata l'ipotesi che i singoli outburst osservati potessero trovare una spiegazione come risultato di una violenta esplosione che libera una densa nube di elettroni relativistici che poi irraggiano per meccanismo di sincrotrone. Le rapide variazioni di intensità osservate in alcune radiosorgenti richiedono particelle accelerate a energie relativistiche in tempi che variano da qualche mese, se non meno, a pochi anni. Se si ammette che le dimensioni della sorgente variabile non possano superare la distanza coperta dalla luce nell'intervallo di tempo caratteristico delle variazioni, si può stimare un limite superiore per le dimensioni della sorgente variabile: le dimensioni tipiche che se ne ricavano sono dell'ordine dell'anno luce. Nota la distanza, si può calcolare un limite superiore per le dimensioni angolari e il campo magnetico e un limite inferiore per l'energia elettronica.

Per le radiogalassie relativamente vicine questa energia minima richiesta è dell'ordine di 10^{52} erg di particelle relativistiche per outburst. Si tratta di un'energia dello stesso ordine dell'energia liberata in una esplosione di supernova. Nel caso dei quasar (ammesso che il loro spostamento verso il rosso sia associato con l'espansione dell'universo e che essi si trovino a distanze cosmologiche) l'energia apparentemente richiesta in ciascun outburst è almeno un milione di volte superiore ed è assai difficile comprendere come una tale quantità di energia possa essere liberata in un volume cosí piccolo e in tempo tanto breve. Inoltre bisogna sottolineare che intensi campi di radiazione di sincrotrone per dense concentrazioni di elettroni relativistici dovrebbero a loro volta far sí che gli elettroni perdano immediatamente la loro energia per effetto Compton inverso piuttosto che per emissione di sincrotrone. Questo effetto si produce quando un elettrone energetico urta un fotone di energia inferiore. Il fotone guadagna energia e l'elettrone ne perde; ne segue che l'energia dell'elettrone viene irraggiata a lunghezza d'onda inferiore come radiazione infrarossa o raggi X e non come radiazione di sincrotrone alle lunghezze d'onda radio.

Questo apparente paradosso fu interpretato da alcuni ricercatori come una prova che o i quasar si trovano a una distanza inferiore a quanto indica il loro spostamento verso il rosso e perciò il loro campo di radiazione deve essere molto piú debole o il meccanismo della radiazione è piú efficiente del meccanismo di sincrotrone. Martin J. Rees dell'Università di Cambridge suggerí una possibile alternativa: la teoria della « supervelocità della luce ». Se la radiosorgente si espande con velocità prossima a quella della luce allora, poiché i segnali radio impiegano un tempo finito per raggiungere un osservatore, il segnale che arriva dalla parte

Un interferometro radio convenzionale utilizza un cavo per collegare i due telescopi che sono distanti fino a qualche chilometro. Per analizzare il segnale radio ad alta frequenza che proviene dalla radiosorgente celeste è necessario convertirlo a frequenza inferiore. Ciò si ottiene miscelando un segnale di un oscillatore locale col segnale di radiofrequenza (*RF*) per creare un segnale di « battimento » a frequenza intermedia (*IF*).

Un interferometro a collegamento radio unisce i radiotelescopi con un « ponte » a microonde analogo a quello usato per le trasmissioni telefoniche a grande distanza. Il segnale dell'oscillatore locale viene trasmesso ai miscelatori e i segnali *IF* rinviati per la correlazione. I segnali *IF* di ciascuna antenna devono essere coerenti (in fase); il segnale dell'oscillatore locale a ciascun estremo deve essere altrettanto coerente.

Un interferometro con registratore su nastro rende possibile la realizzazione dell'interferometria con radiotelescopi distanti quanto due punti estremi della superficie terrestre. (Il collegamento a microonde è di pratica realizzazione solo nelle antenne che sono sulla visuale una rispetto all'altra). I segnali a frequenza intermedia provenienti da ciascuna antenna sono registrati separatamente a ciascun terminale del sistema interferometrico e in seguito i nastri magnetici vengono trasportati in una località comune dove i dati registrati vengono correlati in un grande calcolatore numerico o in uno speciale correlatore.

Un sistema piú raffinato di registrazione su nastro utilizza due radiotelescopi a ciascuna estremità dell'interferometro per osservare simultaneamente due radiosorgenti. Una sorgente serve come punto di riferimento per determinare la fase dell'altra sorgente. Si può stimare direttamente la differenza di fase delle due figure di interferenza, indipendentemente da qualsiasi variazione di fase in uno degli oscillatori locali o nel percorso atmosferico in direzione delle antenne. In questo modo è possibile fare precise misure e ricostruire completamente la distribuzione di intensità combinando le osservazioni fatte su molte basi.

della sorgente che si allontana sarà partito prima, quando era piú vicino al punto origine, del segnale che proviene dalle parti che si avvicinano. Con questa condizione la velocità *apparente* di espansione può arrivare a superare la velocità della luce. Perciò le dimensioni vere della sorgente possono essere maggiori di quelle calcolate con la restrizione che la velocità apparente di espansione sia minore della velocità della luce e l'energia richiesta, che è inversamente proporzionale alla decima potenza delle dimensioni, si riduce notevolmente.

La prova dell'importanza che può avere questo effetto nel quasar 3C 279 si ottenne per la prima volta in una serie di osservazioni transoceaniche fatte tra il 1968 e il 1970 da un gruppo misto di australiani e di americani dell'Istituto di Tecnologia della California. Usando antenne mobili della NASA a Goldstone in California e a Tidbinbilla in Australia come due elementi di un interferometro a lunga base, questo gruppo trovò che una componente della sorgente che era comparsa nel 1966, aveva raggiunto un diametro di 0,001 secondi di arco alla fine del 1969. Il diametro lineare corrispondente è di 12 anni luce, nell'ipotesi che lo spostamento verso il rosso della sorgente (0,54) sia di origine cosmologica.

Perciò, come aveva predetto Rees, la velocità di espansione apparente era circa il doppio di quella della luce. Nell'ottobre 1970 furono eseguite su 3C 279 misure piú precise da parte di un gruppo dell'Istituto di Tecnologia del Massachusetts, della NASA e dell'Università del Maryland usando una base intercontinentale. In origine queste osservazioni dovevano servire a misurare la curvatura gravitazionale dei segnali radio di 3C 279 nel momento in cui questo si avvicinava al Sole, l'8 ottobre, ma essi dimostrarono chiaramente che la sorgente compatta in 3C 279 era complessa e sembrava che fosse costituita di almeno due componenti separate da 0,00155 secondi di arco pari a circa 20 anni luce. Questa sorgente venne osservata di nuovo nel febbraio 1971 da parte dello stesso gruppo affiancato da ricercatori dell'Osservatorio

La radiogalassia Cygnus A, la piú intensa radiosorgente del cielo, appare come un punto confuso al centro di questa fotografia fatta col telescopio da 5 metri di Monte Palomar. Gli studi interferometrici dell'emissione radio della sorgente indicano che essa proviene da due regioni opposte rispetto all'oggetto visibile. La struttura di queste regioni è illustrata, nella stessa scala, nel disegno. Ciascuna delle due componenti principali contiene entro se stessa una piccola sorgente doppia. L'immagine radio si basa su osservazioni fatte con un interferometro radio da 1,6 chilometri dell'Università di Cambridge, un interferometro radio da 2,7 chilometri dell'Osservatorio radioastronomico nazionale e un altro interferometro pure dell'Osservatorio radioastronomico nazionale.

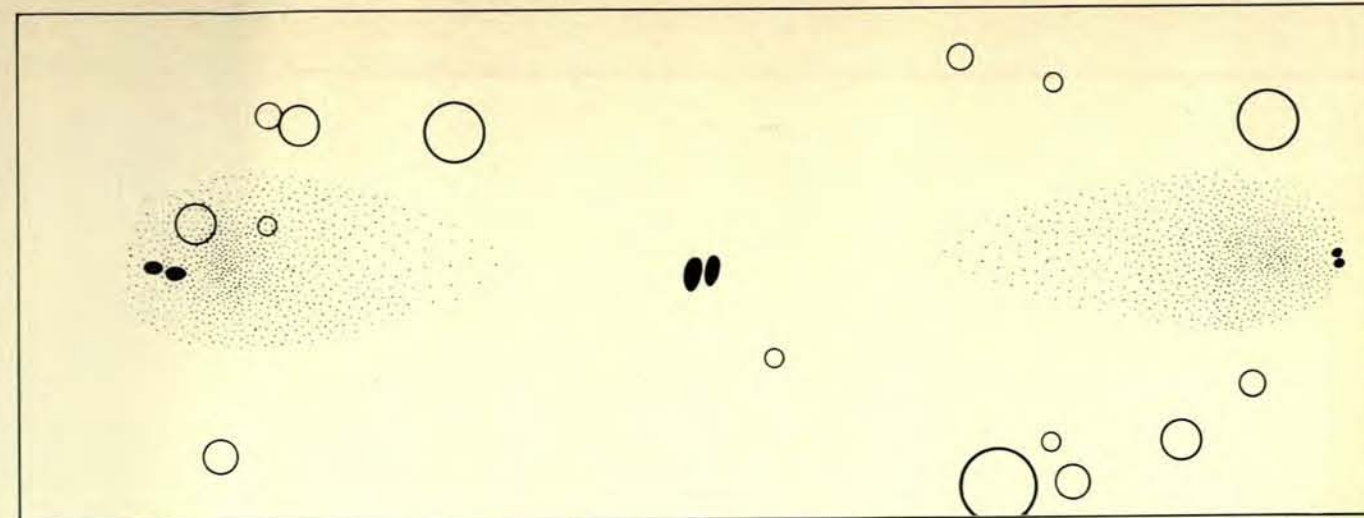
radioastronomico nazionale, dell'Istituto di Tecnologia della California e dal gruppo Cornell usando la stessa base e le stesse tecniche. In solo quattro mesi si era verificata una variazione chiaramente visibile in 3C 279. La sorgente era ancora doppia, ma la separazione era superiore di due anni luce a quella rilevata la prima volta, cioè era cresciuta del 10 per cento. Sembrava cioè che le due componenti si allontanassero da un comune punto origine con una velocità apparente circa tre volte superiore a quella della luce.

Sebbene tutto ciò sembrasse una conferma delle previsioni di Rees, restava ancora un grave problema. La differenza nello spostamento Doppler delle due componenti avrebbe dovuto far sí che la componente che si avvicinava apparisse piú intensa di quella che si allontanava. Invece le intensità osservate delle due componenti erano uguali entro pochi per cento per cui lo spostamento Doppler doveva essere esattamente compensato dalla differenza nella luminosità intrinseca delle due componenti e ciò sembra una coincidenza veramente un po' strana.

D'altra parte i moti apparenti possono essere un effetto di «riflettore» causato dall'eccitazione di materiale stazionario da parte di un fronte d'onda in moto. Il punto di contatto tra fronte d'onda e materiale sembra che si muova con velocità quasi illimitata, come un riflettore ruotante visto a grande distanza. È possibile che la variazione apparente nelle dimensioni osservate nella struttura di 3C 279 possano non essere affatto il risultato di moti delle componenti; possono riflettere unicamente una variazione di intensità relativa di una o piú componenti. Per esempio un anello con un punto sorgente nel centro o una sorgente tripla danno l'impressione di espandersi se l'intensità della componente interna diminuisce o l'intensità delle parti esterne cresce. Sebbene questa sia l'interpretazione dei dati piú immediata e meno spettacolare, resta ancora da risolvere il problema dell'enorme energia richiesta, a meno che la distanza di 3C 279 non sia molto inferiore a quella dedotta dal suo spostamento verso il rosso.

Le misure attuali non sono in grado di distinguere tra questi vari modelli sebbene ci si possa aspettare che in futuro osservazioni piú precise dimostrino se vi è o no un moto effettivo delle singole componenti. Ma anche se venissero confermate le grandi velocità apparenti vi saranno ancora piú domande che risposte. Coloro che ritengono che lo spostamento verso il rosso dei quasar sia cosmologico possono addurre la teoria della supervelocità della luce per ridurre le enormi richieste di energia che hanno rappresentato uno dei principali scogli all'interpretazione cosmologica dello spostamento verso il rosso dei quasar (si veda l'articolo *L'evoluzione dei quasar* di Maarten Schmidt e Francis Bello, in « Le Scienze », n. 36, agosto 1971). Coloro che ritengono che i quasar siano locali mettono in evidenza che la supervelocità apparente della luce può essere solo una deduzione dall'ipotesi che i quasar sono a grandi distanze. Fanno notare che l'apparente ritmo di espansione angolare, le densità di flusso osservate e il ritmo di variazione sono simili sia per le galassie vicine sia per i quasar supposti lontani e che le differenze apparentemente profonde nelle proprietà intrinseche corrispondenti non sono altro che il risultato dell'ipotesi che gli spostamenti verso il rosso dei quasar siano cosmologici.

Per quanto le misure di variazione apparente nella struttura delle radiosorgenti compatte non aiuti a chiarire questo problema, esse possono stabilire *1*) se i successivi outburst osservati avvengono esattamente nello stesso volume o se sono separati nello spazio, *2*) la cinematica o meccanica dell'espansione e *3*) come variano nel tempo il campo magnetico e l'energia totale. Con queste informazioni possiamo sperare di arrivare a una migliore comprensione del processo con cui eventi violenti hanno portato alla creazione di intense radiosorgenti e in particolare a comprendere meglio la sorgente di energia e come questa energia si sia convertita in particelle relativistiche.

Anche se i sensibili sistemi interferometrici a lunga base si sono sviluppati inizialmente per studiare le radiosorgenti extragalattiche compatte, tale tecnica è stata poi usata per studiare la radioemissione dalle nubi interstellari del radicale idrossile OH e del vapor acqueo. Queste nubi, che irradiano come giganteschi maser interstellari, emettono segnali radio tanto potenti che si possono facilmente fare misure interferometriche ad alta risoluzione delle loro dimensioni con registratori a nastro per audiofrequenza ad alta fedeltà. Tutte le osservazioni eseguite finora di questi maser interstellari sono però state fatte con tecniche piú raffinate a larga banda che permettono misure simultanee di nubi diverse (che a causa delle loro elevate velocità in varie direzioni sono spostate per effetto Doppler e irradiano in un largo dominio di frequenze). In genere queste nubi sono sparse in un volume dell'ordine di molti anni luce di raggio, sebbene le singole componenti abbiano dimensioni dell'ordine di un'unità astronomica (la distanza tra il Sole e la Terra).

Una delle principali limitazioni all'interferometria a registratore su nastro è stata finora la mancanza di una sufficiente stabilità dell'oscillatore per determinare la fase della configurazione di interferenza. Abbiamo notato il progresso da aspettarsi dall'uso di maser all'idrogeno come standard di frequenza. Anche con oscillatori infinitamente stabili però vi sono ancora problemi dovuti alle fluttuazioni nella lunghezza del percorso attraverso l'atmosfera in due siti di osservazione molto distanti tra loro. Si stanno ora compiendo esperienze con un totale di quattro antenne per superare queste difficoltà ed eliminare l'effetto dell'instabilità degli oscillatori locali. In questi esperimenti a doppio interferometro vengono usate due antenne all'Osservatorio radioastronomico nazionale di Green Bank e due all'Osservatorio di Owens Valley dell'Istituto di Tecnologia della California per osservare simultaneamente due sorgenti e determinare le loro posizioni relative.

Se l'interferometria a stabilità di fase potesse essere fatta su basi paragonabili alle dimensioni terrestri, si potrebbero determinare teoricamente le posizioni angolari con una precisione vicina a 0,0001 secondi di arco. Tale precisione renderebbe possibile la misura dei moti reali di oggetti galattici vicini come pulsar, maser molecolari interstellari e quelle stelle che hanno forte emissione radio. È eccitante la possibilità di applicare questa tecnica alla determinazione delle piccole deviazioni dal moto uniforme di stelle, deviazioni che potrebbero essere causate dall'attrazione gravitazionale di pianeti: si tratta infatti del solo metodo diretto per scoprire altri sistemi planetari nella nostra galassia. Inoltre la scoperta di piccoli moti apparenti dei pulsar o dei maser molecolari interstellari dovuti al moto della Terra intorno al Sole (parallasse) renderebbe possibile la prima determinazione diretta della loro distanza.

Un'altra applicazione particolarmente interessante dell'interferometria a registrazione su nastro è la prova della previsione della teoria della relatività generale di Einstein che una generica onda elettromagnetica, come un'onda radio o un'onda luminosa, passando vicino a un corpo viene deflessa dal campo gravitazionale del corpo stesso. La deflessione prevista per i raggi provenienti da una sorgente celeste distante che passano vicino al bordo del Sole è di 1,76 secondi di arco e sono già state fatte molte misure ottiche delle posizioni di stelle apparentemente vicine al Sole al momento di un'eclisse solare. Sebbene queste misure abbiano indicato uno spostamento in accordo con quello previsto dalla teoria generale, la precisione delle misure è al massimo del 10 per cento della deflessione, cioè non è sufficiente per distinguere tra le previsioni della teoria della relatività e le teorie gravitazionali concorrenti.

L'abilità nel determinare le posizioni angolari relative di oggetti celesti con una precisione di 0,001 secondi di arco per mezzo dell'interferometria radio offre una precisione potenziale superiore all'uno per cento. Le circostanze favorevoli per una tale esperienza si ripetono ogni ottobre quando il quasar 3C 279 viene eclissato dal Sole. A 10 gradi di distanza si trova un altro quasar, 3C 273, che fornisce cosí un'opportuna posizione di riferimento per misurare la deflessione giornaliera di 3C 279 durante il suo moto apparente di avvicinamento al Sole.

Richard Sramek ha eseguito un'esperienza di questo tipo con un interferometro convenzionale dell'Osservatorio radioastronomico nazionale che ha una base di 2,7 chilometri. I suoi risultati danno un leggero disaccordo coi risultati previsti dalla teoria della relatività generale e si accordano meglio con un'altra teoria: la teoria gravitazionale di Brans-Dicke. La precisione non è però sufficiente per escludere la prima. D'altra parte questo è solo uno dei pochi risultati sperimentali ottenuti in piú di 60 anni, da quando cioè la teoria di Einstein è stata pubblicata; un risultato che propone un leggero disaccordo e l'attuale possibilità di migliorare la precisione di uno o due ordini di grandezza costituisce un'interessantissima prospettiva per la fisica fondamentale.

Un gruppo NASA-Istituto di Tecnologia del Massachusetts ha guidato vasti studi dell'eclisse di ottobre di 3C 279 con interferometri transcontinentali, ma finora non si sono ottenuti risultati conclusivi. Ci si attende che il programma comune dell'Osservatorio radioastronomico nazionale e dell'Istituto di Tecnologia della California, che utilizza due antenne a Green Bank e due a Owens Valley per misure simultanee delle differenze nelle posizioni di

3C 279 e 3C 273, possa superare molte difficoltà sperimentali e possa arrivare a una verifica molto precisa della teoria della relatività generale.

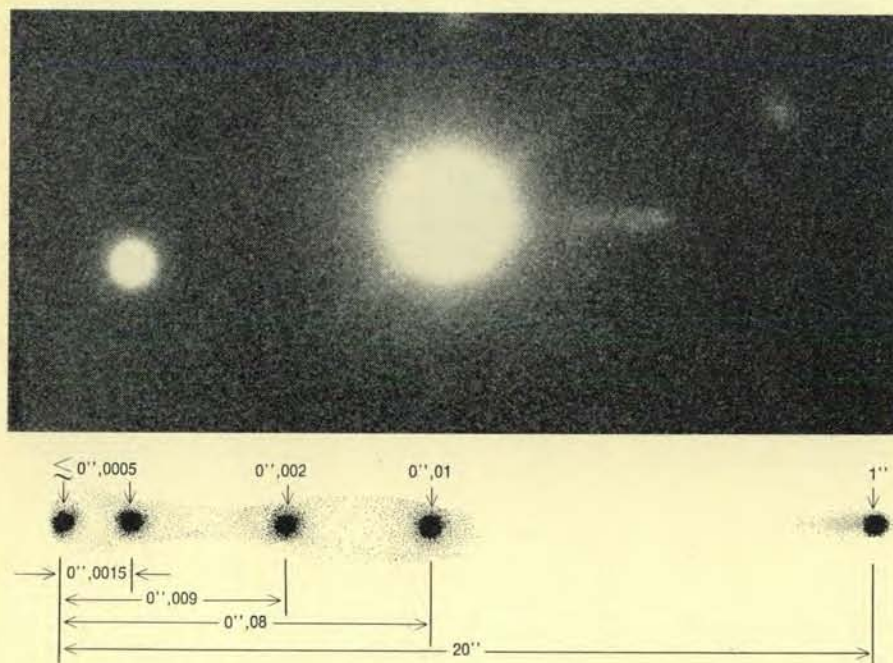
Anche quando saranno superati i problemi strumentali di controllo della stabilità dell'oscillatore locale e di eliminazione degli effetti atmosferici, non sarà ancora semplice la misura delle posizioni angolari con precisione superiore a 0,001 secondi di arco. A questo livello di precisione introducono errori significativi le incertezze del moto di rotazione della Terra, della direzione dell'asse di rotazione terrestre in ogni istante e delle coordinate relative delle antenne sulla superficie terrestre. Gli errori sulla fase introdotti da queste incertezze sono tutti legati tra loro e si possono separare mediante osservazioni ripetute di un gran numero di opportune sorgenti con le tecniche che si applicano comunemente nelle misure ottiche di astrometria. Fatto ciò sarà possibile determinare *a*) posizione nel cielo entro 0,001 secondi di arco, *b*) durata del giorno entro 0,0001 secondi di tempo, *c*) distanza delle basi transcontinentali e intercontinentali entro pochi centimetri e *d*) sincronizzazione globale di un orologio entro pochi nanosecondi. La precisione di questi dati aprirà ai radioastronomi tutta una serie di esperimenti geofisici, ivi comprese misure dirette delle « maree » della crosta terrestre, della deriva dei continenti, delle variazioni nel moto di rotazione della Terra e dell'oscillazione dell'asse terrestre.

Vi è un limite alla risoluzione degli interferometri a lunga base o questi continueranno a estendersi nello spazio fino alla Luna e oltre? Come la turbolenza dell'atmosfera influisce sull'astronomia ottica, così influirà sulla radioastronomia alle brevi lunghezze d'onda. Ancora più importante è l'effetto della diffusione delle onde radio da parte degli elettroni del « vento solare » e del mezzo interstellare che diventano importanti per misure alle grandi lunghezze d'onda. Le prove attuali indicano che solo per lunghezza d'onda inferiori ai 10 centimetri potranno essere efficacemente usate basi molto superiori al diametro terrestre. Le regioni di emissione OH che irradiano a 18 centimetri e i pulsar che irradiano soprattutto alle lunghezze d'onda metriche non sono probabili candidati per lo studio con un interferometro spaziale.

Per quanto riguarda le sorgenti di sincrotrone vi è una limitazione ancora più fondamentale a una base grandissima. Come abbiamo notato, se le dimensioni del sistema di sincrotrone sono inferiori alle dimensioni critiche, le particelle relativistiche perdono rapidamente tutta la loro energia per effetto Compton inverso e non hanno perciò il tempo di irraggiare energia radio. Queste dimensioni angolari critiche sono proporzionali alla lunghezza d'onda per cui la densità di flusso è massima. Poiché la risoluzione di un interferometro a lunghezza fissa è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda di osservazione, i due effetti si elidono l'un l'altro se le osservazioni sono fatte a lunghezza d'onda vicine a quella di massima intensità (come avviene di solito per ottenere la massima sensibilità). La massima lunghezza di base necessaria per risolvere le sorgenti di sincrotrone è perciò quasi indipendente dalla lunghezza d'onda a cui si lavora; infatti è paragonabile al diametro terrestre per le più forti radiogalassie e per i quasar. Non saranno perciò probabilmente necessarie basi nello spazio o sulla Luna per studiare anche i piccoli nuclei radio emettitori e i quasar.

Però la semplice estensione delle basi di un interferometro è solo parte della storia. Si richiedono molte basi di lunghezza intermedia per dare un quadro completo della complessa struttura radio osservata nelle radiogalassie, nei quasar e nei maser molecolari interstellari. Oggi il semplice interferometro radio a due elementi del 1950 è diventato un apparato di sintesi a molti elementi. I radioastronomi attendono impazienti il momento in cui parecchi radiotelescopi sparsi in tutto il mondo potranno essere collegati insieme per formare un gruppo a iperrisoluzione.

Anche se già esistono radiotelescopi adatti a questo scopo, non si trovano nelle migliori località. Inoltre a causa della grande varietà di altri problemi che costituiscono oggetto di studio da parte di radioastronomi di tutto il mondo, e la grande varietà di strumenti impiegata nei differenti osservatori, è praticamente impossibile programmare un gran numero di radiotelescopi per osservare lo stesso oggetto a una lunghezza d'onda comune. Per ottenere un campo sufficiente di distanze tra gli interferometri sarà probabilmente necessario costruire una speciale rete globale di interferometri a lunga base.

Sarà enorme il compito di raccogliere tutte le registrazioni su nastro in una località comune e di correlare tutte le possibili coppie di telescopi. Una soluzione attraente sarebbe quella di fare del tutto a meno delle registrazioni su nastro e telemetrare i dati da ciascuna antenna a un centro comune per mezzo di satelliti che compiano orbite sincrone. Questa rete realmente a lunga base richiederebbe un grande sforzo internazionale, ma sarebbero ovviamente enormi le possibilità che offrirebbe sia agli astrofisici sia ai geofisici.

Il quasar 3C 273 è visibile nella fotografia fatta col telescopio da 5 metri di Monte Palomar. A destra dell'immagine centrale si estende un « getto peculiare ». Il disegno, che non è nella stessa scala della fotografia, illustra la struttura radio dell'oggetto. I numeri nel disegno danno le dimensioni delle componenti in secondi. La lunghezza d'onda dell'emissione radio diventa maggiore al crescere della distanza dal centro.

La presenza di proteine all'interno del doppio strato lipidico delle membrane cellulari viene dimostrata mediante microscopia elettronica con la tecnica del congelamento. Si sospendono le membrane in acqua e si congela il tutto, per affettare poi il blocco di ghiaccio con una lama affilata. È così possibile tagliare alcune membrane secondo un piano parallelo alla loro superficie. Questo viene poi trattato con vapori di platino e di carbonio, che ne consentono lo studio al microscopio elettronico. La fotografia in alto mostra numerose particelle di diametro compreso tra 5 e 8,5 nm inglobate nella compagine di una membrana di globulo rosso di coniglio. Le altre due immagini mostrano quanto si riduca il numero di tali particelle trattando la membrana con un enzima proteolitico che digerisce il 45 per cento (*in mezzo*) oppure il 70 per cento (*in basso*) delle proteine della membrana. Le particelle mancanti sono state presumibilmente idrolizzate dall'enzima. Queste fotografie, con un ingrandimento di 95 000 volte, sono state eseguite da L. H. Engstrom presso l'Università della California a Berkeley.

La struttura delle membrane cellulari

Il sottile e robusto involucro delle cellule viventi consiste di lipidi, esteri fosforici e proteine. Le proteine fungono insieme da barriera e da trasportatore, controllando ciò che attraversa la membrana

di C. Fred Fox

Ogni cellula vivente è racchiusa entro una membrana che non funge solamente da involucro protettore, ma anche da barriera selettiva, che consente l'ingresso alle sostanze nutritive e ad altre specie chimiche essenziali mentre lascia uscire i prodotti di scarto del metabolismo. Questa membrana citoplasmatica può anche « pompare » delle sostanze contro una barriera di potenziale elettrochimico, è cioè in grado di estrarle da una soluzione diluita trasportandole dal lato opposto della membrana, dove si trovano in concentrazione molto superiore. In questo modo la membrana citoplasmatica riesce a regolare gli scambi di materia tra la cellula e l'ambiente in cui essa si trova.

Le cellule degli organismi superiori possiedono, oltre alla membrana citoplasmatica, varie altre membrane interne, che circondano delle strutture chiamate organelli, aventi funzioni assai specializzate. Per esempio, i mitocondri ossidano le sostanze nutritive, provvedendo così l'energia necessaria per le altre funzioni della cellula, e i cloroplasti sono la sede della fotosintesi.

Le membrane si compongono essenzialmente di due specie chimiche: proteine e lipidi. Le proteine fungono da enzimi, o catalizzatori biologici, e consentono alla membrana di svolgere le sue funzioni caratteristiche. I lipidi costituiscono l'ossatura principale della membrana. I lipidi naturali piú semplici, come i grassi e le cere, sono insolubili in acqua. I lipidi che si incontrano nelle membrane cellulari hanno una molecola costituita da una coda idrofobica, insolubile in acqua, e da una testa idrofila, solubile in acqua. La regione idrofila viene anche detta polare, in quanto può portare una carica elettrica, mentre la regione idrofobica non è polare.

Nella maggior parte dei lipidi delle membrane cellulari la regione idrofobica è costituita dalle catene idrocarburiche degli acidi grassi, che sono molecole idrocarburiche con un gruppo carbossile (—COOH) a una estremità. Un tipico lipide della membrana è costituito da due molecole di acido grasso legate a una di glicerina. La glicerina, a sua volta, è legata a un gruppo polare costituito per lo piú da una molecola di acido fosforico, che reca una carica elettrica. I lipidi di questo tipo vengono chiamati fosfolipidi.

Immergendo in una soluzione di fosfolipidi, in condizioni opportune, un generatore di ultrasuoni di elevata potenza, le molecole di fosfolipide si aggregano in vescichette, dette liposomi. La disposizione dei fosfolipidi nella parete dei liposomi e nelle membrane cellulari è stata studiata per mezzo della diffrazione dei raggi X, un metodo che consente di determinare la distanza che intercorre tra gruppi di atomi che si ripetono in una struttura ordinata. Gli studi compiuti con questa tecnica da M.F. Wilkins e dai suoi collaboratori del King's College di Londra mostrano che i gruppi polari dei lipidi sono disposti in file parallele che distano circa 4 nm (1 nm = 10^{-9} m) e che le catene idrocarburiche degli acidi grassi sono disposte parallelamente l'una all'altra in gruppi di 50 e piú molecole di fosfolipide.

I risultati della diffrazione dei raggi X consentono di proporre un modello per le pareti dei liposomi e le membrane cellulari nel quale i fosfolipidi si dispongono in due strati paralleli (*si vedano le figure a pagina 49*). I gruppi polari si dispongono lungo le superfici esterne del doppio strato, mentre le catene alifatiche si dispongono all'interno, perpendicolarmente alle superfici della membrana. Questo modello per la disposizione dei fosfolipidi nella struttura delle membrane è identico a quello proposto da James F. Danielli e da Hugh Davson negli anni trenta, quando non si disponeva ancora di dati precisi sulla struttura delle membrane. È anche la configurazione che corrisponde al minimo di energia potenziale per un doppio strato di molecole con gruppi polari e non polari, in quanto non pone limiti alla interazione dei primi con l'acqua in cui è immersa la membrana.

Al contrario dei lipidi, le proteine non formano delle strutture ordinate nella compagine delle membrane, quindi la loro disposizione non può essere determinata con l'aiuto della diffrazione dei raggi X. Questa assenza di ordine non deve sorprendere. Ogni membrana cellulare incorpora una grande varietà di molecole proteiche, molto diverse per dimensioni molecolari e per frequenza: certe proteine possono infatti essere 10 e anche 100 volte piú frequenti di altre.

Dal momento che un'analisi strutturale generale non consente di scoprire molte cose sulla disposizione delle proteine, si è preferito limitare lo studio a poche specie di protidi. Nel modello di Danielli e Davson si ipotizza che le proteine siano tutte disposte esternamente al doppio strato di fosfolipidi, su entrambi i lati della membrana. Per quanto i dati ottenuti con la diffrazione dei raggi X e con la microscopia elettronica a elevata risoluzione sembrino confermare questa ipotesi, almeno per quanto riguarda la maggior parte delle proteine contenute nelle membrane, alcuni fenomeni biochimici fanno ritenere che questo modello descriva la realtà dei fatti in maniera molto semplicistica. Le prove di una diversa disposizione delle proteine sono state

fornite soprattutto da Marc Bretscher dei laboratori del Medical Research Council a Cambridge e da Theodore L. Steck, G. Franklin e Donald F.H. Wallach della Harvard Medical School.

Bretscher ha marcato una delle proteine piú frequenti nella membrana citoplasmatica del globulo rosso con una sostanza radioattiva capace di legarsi alla proteina, ma non di attraversare la membrana. La proteina è stata marcata in due modi (*si vedano le figure a pagina 50 e 51*). Dapprima si esposero alla sostanza marcante dei globuli rossi intatti, in modo da marcare solo le molecole di proteina poste sulla superficie esterna della cellula. Successivamente si marcarono dei glubuli rossi previamente danneggiati, in modo che la sostanza marcante potesse raggiungere anche la proteina eventualmente disposta sulla superficie interna della membrana.

Le membrane marcate nelle due diverse condizioni vennero poi trattate separatamente per isolare la proteina marcata. La proteina purificata proveniente dai due campioni venne successivamente idrolizzata in frammenti facilmente identificabili per trattamento con un enzima proteolitico. Infine un piccolo campione dell'idrolizzato fu deposto su un angolo di un foglio di carta da filtro, per effettuare la separazione dei suoi componenti con il metodo detto *fingerprinting*. Con questa tecnica si effettua prima una separazione cromatografica di vari gruppi di frammenti della proteina operando lungo un margine del foglio di carta. Successivamente si ruota il foglio di 90° e si effettua una elettroforesi nella nuova direzione. Nella prima fase i gruppi di frammenti si separano l'uno dall'altro in quanto ognuno è caratterizzato da una ben definita velocità di migrazione relativa alla velocità con cui fluisce il solvente. Nella seconda fase si distinguono i singoli componenti di ognuno dei gruppi separati cromatograficamente, in quanto le loro velocità di migrazione entro un campo elettrico sono diverse da quelle che avevano nella prima fase, in assenza di campo elettrico.

Effettuata la separazione, si pose la carta da filtro su una pellicola radiografica, in modo da rivelare i punti in cui erano andati a disporsi i frammenti legati alla molecola marcante. Confrontando l'annerimento delle pellicole esposte ai *fingerprint* degli idrolizzati ricavati dalle membrane marcate nelle due diverse condizioni, fu evidente che i frammenti marcati erano molto piú numerosi nell'idrolizzato ottenuto da membrane marcate su entrambe le superfici. Ciò dimostra che quella proteina da cui prende origine quel sovrappiú di frammenti marcati deve trovarsi sulla superficie interna della membrana.

Steck e i suoi collaboratori ottennero risultati simili impiegando due tipi di vescichette chiuse, costruite utilizzando come materia prima le membrane dei globuli rossi. Con un tipo di preparazione (vescichette diritte) viene esposta al mezzo acquoso esterno la superficie esterna della membrana. Con l'altro tipo (vescichette rovesciate) si espone al mezzo esterno la superficie interna della membrana. Trattando i due tipi di vescichette con un enzima proteolitico, si possono idrolizzare solo le proteine che vengono a contatto con il mezzo esterno, in cui si trova l'enzima. Steck trovò che alcune proteine venivano idrolizzate in entrambe le preparazioni, cosa che dimostra che esse compaiono su entrambe le facce della membrana del globulo rosso. Altre proteine vengono idrolizzate solo in una delle due preparazioni e si trovano quindi su una sola delle due superfici della membrana. Si prova cosí la teoria che le membrane cellulari non siano simmetriche. Già da molti anni, infatti, si sospettava che le membrane dovessero essere asimmetriche, in quanto si riteneva che le superfici esterna e interna dovevano svolgere funzioni biologiche differenti. La messa a punto di una tecnica per la preparazione di vescichette diritte e rovesciate dovrebbe risultare estremamente utile per determinare la faccia di una membrana su cui si trova una determinata proteina e quindi quali siano esattamente le sue funzioni.

Daniel Branton e i suoi collaboratori dell'Università della California a Berkeley hanno messo a punto la tecnica di preparazione dei campioni per microscopia elettronica mediante congelamento e l'hanno utilizzata per lo studio della struttura interna delle membrane. Una sospensione acquosa di membrane viene congelata rapidamente e successivamente affettata con una lama molto affilata. Dove la superficie di una membrana corre parallela al piano di taglio è probabile che essa venga tagliata nel mezzo del doppio strato lipidico. Effettuato il taglio si evapora sulla sua superficie un film sottile di platino e carbonio e su questa replica della superficie congelata si possono osservare, mediante microscopia elettronica, i dettagli della struttura del piano di frattura e delle membrane che vi si trovano.

La microscopia elettronica delle membrane sezionate rivela l'esistenza di molte particelle con dimensioni da 5 a 8,5 nm sulla superficie interna delle membrane stesse. Queste particelle scompaiono se le membrane vengono trattate preventivamente con un enzima proteolitico: sono quindi probabilmente delle molecole proteiche o degli aggregati di proteine (*si veda la figura a pagina 46*). In base a una valutazione del numero di particelle proteiche cosí rivelate, Branton e i suoi collaboratori hanno dedotto che dal 10 al 20 per cento dello spazio interno di numerose membrane biologiche è riempito da proteine.

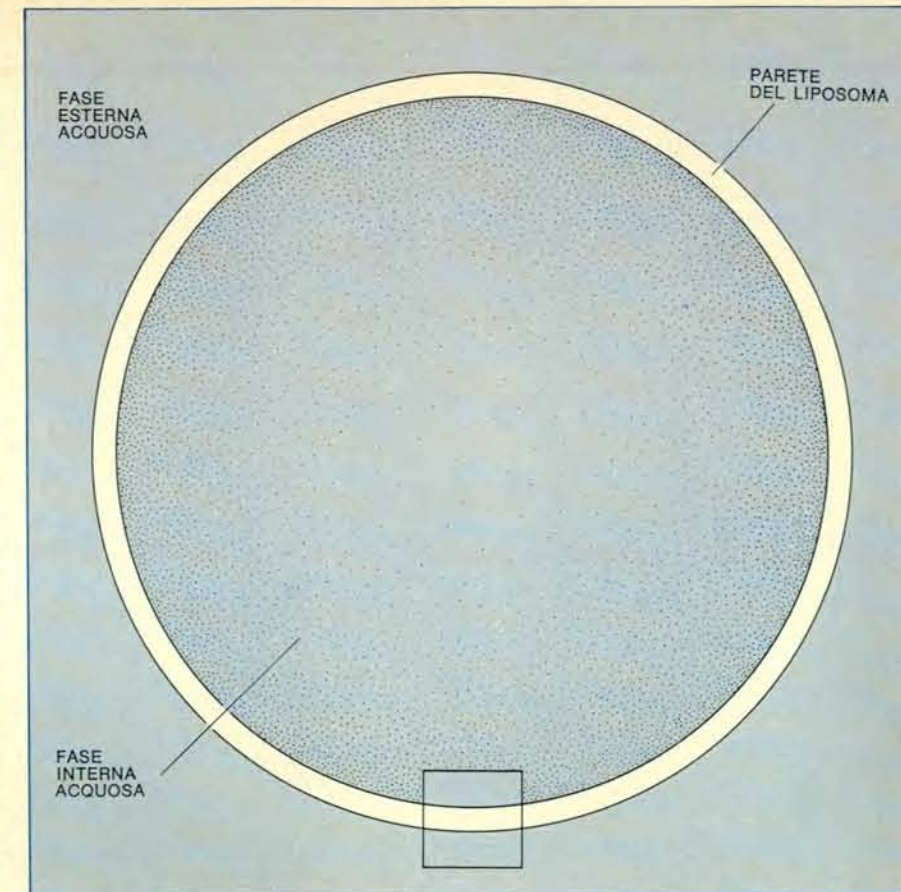
Una frazione compresa tra un quinto e un quarto della massa di proteine contenute in una cellula è legata a delle membrane. La rimanente parte è per lo piú disciolta nel mezzo acquoso all'interno della cellula. Per discioglierle le proteine della membrana in un mezzo acquoso occorre aggiungere dei tensioattivi per facilitarne la dispersione. Ci si aspetterebbe quindi che la composizione chimica delle proteine delle membrane sia diversa da quella delle proteine solubili, ma in realtà non è cosí.

TESTA (POLARE)
GLICERINA
CODE DEGLI ACIDI GRASSI (NON POLARI)

I lipidi che costituiscono l'ossatura delle membrane sono delle molecole complesse, con testa idrofila e coda idrofoba. La regione idrofila, o polare, consiste di una molecola di acido fosforico che, insieme ad altre, è legata a una molecola di glicerina. Questo gruppo polare, a contatto con l'acqua, è spesso portatore di cariche elettriche. La glicerina funge da ponte tra le catene idrocarburiche di due acidi grassi, che costituiscono la regione non polare del lipide. In questo schema semplificato le linee a zig zag rappresentano le catene idrocarburiche: ogni vertice è occupato da un atomo di carbonio legato a due atomi di idrogeno. Il carbonio terminale di ogni catena lega invece tre atomi di idrogeno. I lipidi esterificati con acido fosforico vengono detti fosfolipidi.

Gli amminoacidi che compongono le proteine si possono classificare in due categorie: polari e non polari. S.A. Rosemberg e Guido Guidotti della Harvard University hanno studiato la composizione delle proteine estratte da numerose membrane, trovando che contengono praticamente la stessa percentuale di amminoacidi polari e non polari che si ritrova nelle proteine solubili del comune batterio del colon *Escherichia coli*. Quindi l'insolubilità in acqua delle proteine delle membrane non va ricercata nella composizione chimica.

Gli studi condotti da L. Spatz e Philipp Strittmatter della Università del Connecticut dimostrano che la spiegazione piú probabile dell'insolubilità delle proteine delle membrane va ricercata nella disposizione degli amminoacidi, piú che nella loro natura. Spatz e Strittmatter hanno sottoposto le membrane di cellule epatiche di coniglio a un leggero trattamento con un enzima proteolitico. In questo modo si separava dalla proteina la parte biologicamente attiva, detta citocromo b_5. Separatamente hanno isolato la molecola proteica intatta, trattandola successivamente con l'enzima proteolitico, per separarne la parte attiva. Quest'ultima, sia che venisse ottenuta direttamente dalle membrane, sia che venisse separata dalla proteina purificata, risultava particolarmente ricca in amminoacidi polari. Al contrario, i frammenti proteici insolubili in acqua da cui era stata estratta la parte attiva erano particolarmente ricchi in amminoacidi non polari. Se ne può quindi dedurre che almeno alcune delle proteine delle membrane sono costituite da una regione non polare, immersa nel doppio strato lipidico, e da una regione polare, che si trova sulla superficie esterna della membrana.

A questo punto dobbiamo chiederci come possono avvenire gli scambi di materia tra l'interno e l'esterno di una cellula. La zona non polare, costituita dalle code alifatiche dei lipidi della membrana è incompatibile con tutte le piccole molecole idrosolubili come gli zuccheri e gli amminoacidi e con gli ioni metallici, formando quindi una barriera che queste sostanze non possono attraversare liberamente. Se si misura la velocità con cui il glucosio attraversa le pareti dei liposomi, si trova infatti che è molto piú bassa di quella con cui attraversa le membrane cellulari. Fatti di questo genere hanno

Sottoponendo una sospensione di fosfolipidi a un flusso di ultrasuoni di grande energia si formano delle vescichette chiuse contornate da una membrana artificiale, dette liposomi. La diffrazione dei raggi X dimostra che i fosfolipidi della membrana sono disposti ordinatamente come nelle membrane naturali. (*Si veda la figura qui sotto*).

Questa sezione trasversale della membrana dei liposomi mostra come questa sia formata da due strati di molecole lipidiche, le teste polari sono rivolte verso la fase acquosa all'esterno della membrana, mentre le code non polari si fronteggiano all'interno.

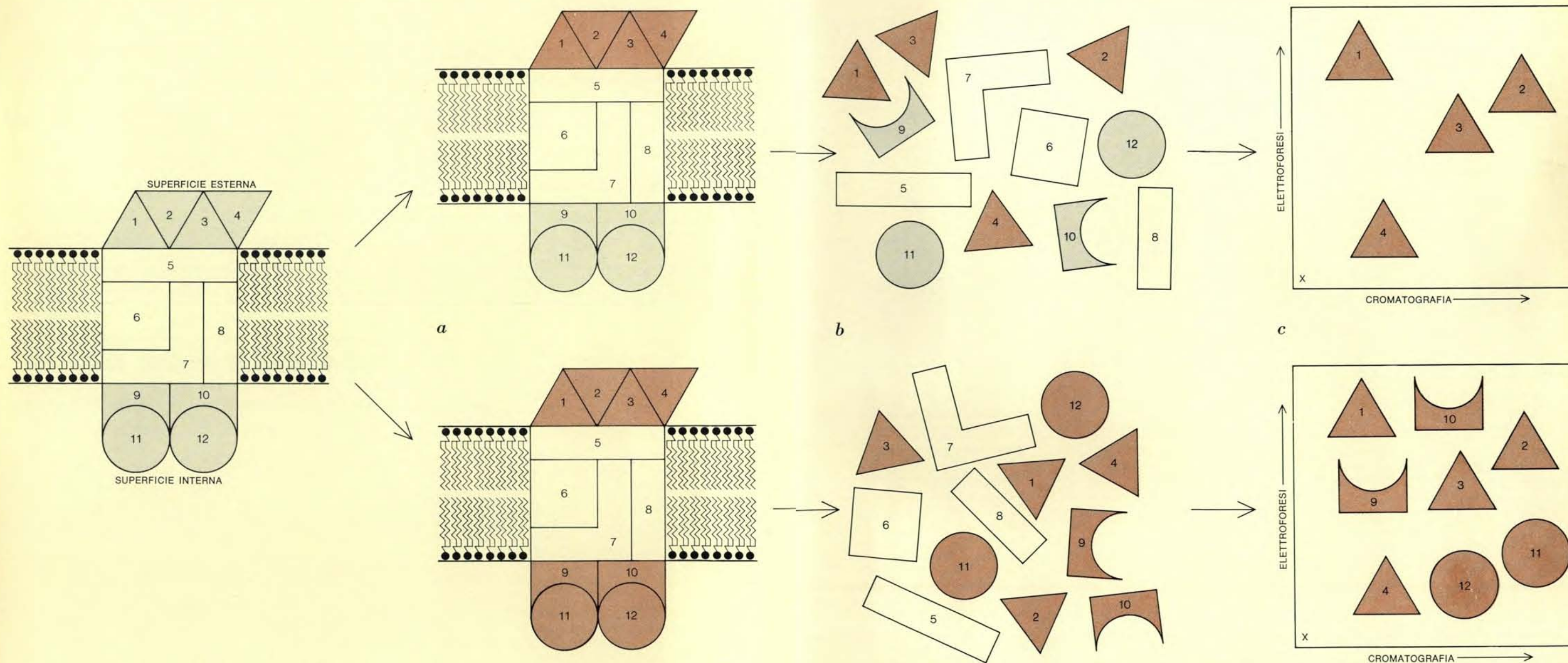
indotto a pensare che nella compagine delle membrane biologiche debbano essere presenti delle entità chiamate trasportatori (*carrier*), che servono a consentire l'attraversamento della barriera lipidica da parte delle piccole molecole polari e degli ioni.

Questi trasportatori debbono essere molto selettivi. Per esempio il trasportatore del glucosio non riveste alcuna funzione nel corso del trasporto di altri zuccheri o di amminoacidi. Un modello interessante per il trasporto selettivo di ioni è stato messo a punto da A.D. Bangham, M.M. Standish e J.C. Watkins dell'Agricultural Research Council di Cambridge in Inghilterra e da J. B. Chappell e R. A. Crofts dell'Università di Cambridge. Come modello di trasportatore essi hanno impiegato la valinomicina, un antibiotico non polare, solubile nei lipidi, costituito da solo 12 amminoacidi. Sostanze di questo tipo vengono chiamate polipeptidi per distinguerle dalle proteine, che sono chimicamente identiche, ma con molecole molto piú grandi. La valinomicina si combina con le membrane lipidiche costituite da un doppio strato di fosfolipidi e le rende permeabili agli ioni potassio, ma non agli ioni sodio.

La variazione di permeabilità della membrana lipidica si può studiare facilmente osservando la variazione di resistenza elettrica attraverso di essa quando venga posta a separare due compartimenti contenenti una soluzione acquosa di un sale potassico. Si introduce dapprima una piccola quantità di fosfolipide in un forellino tra le due camere e si forma spontaneamente un foglietto bimolecolare che chiude il foro. Successivamente si introducono nei due compartimenti degli elettrodi per misurare la resistenza elettrica dovuta alla membrana artificiale lipidica.

In assenza di valinomicina la resistenza opposta dalla membrana lipidica è di diversi ordini di grandezza maggiore di quella tipica delle membrane biologiche: circa 10 milioni di ohm per centimetro quadrato, in confronto a 10 o, al massimo, 10 000. Questo fatto sta a indicare che la membrana lipidica è praticamente impermeabile agli ioni. Aggiungendo ai compartimenti contenenti la soluzione del sale potassico un quantitativo piccolissimo di valinomicina (10^{-7} grammi di antibiotico per millilitro di soluzione) la resistenza elettrica diminuisce di cinque ordini di grandezza e la permeabilità della membrana aumenta quindi di un fattore identico. La permeabilità del modello di membrana è ora simile a quello delle membrane biologiche.

Se ora si ripete l'esperimento ponendo nei compartimenti una soluzione di cloruro di sodio anziché di potassio, si trova che l'aggiunta di valinomicina provoca solo una piccolissima variazione di resistenza elettrica. Ne segue che la valinomicina possiede due caratteristiche essenziali di un trasportatore biologico: aumenta la permeabilità ed è fortemente selettiva per una determinata sostanza. Viene ora spontaneo chiedersi come agisca la valinomicina.

Innanzitutto la valinomicina è una sostanza non polare. Quindi è fisicamente compatibile con la parte del doppio strato lipidico che contiene le catene alifatiche e può quindi attraversarla. Secondariamente, la valinomicina può evidentemente diffondere tra le due superfici del doppio strato. S. Krasne, George Eisenman e G. Szabo dell'Università di California a Los Angeles hanno dimostrato che l'aumento di

La disposizione delle proteine nelle membrane può essere studiata marcandole con sostanze radioattive. Questo schema spiega un esperimento di marcatura delle proteine della membrana del globulo rosso (*a*). Esponendo alla sostanza radioattiva delle cellule intatte (*in alto*), si marcano solo le parti delle proteine che sporgono sulla superficie esterna della membrana (*in colore*). Se invece le cellule vengono danneggiate prima della marcatura (*in basso*), la sostanza radioattiva può raggiungere anche le parti affacciate alla superficie interna della membrana. Le differenze nella marcatura vengono rese evidenti isolando e purificando la proteina marcata nelle due condizioni. Essa viene successivamente demolita in frammenti (*pezzetti numerati*) con un enzima proteolitico (*b*). Un campione dei due idrolizzati viene poi deposto in un angolo di un foglio di carta da filtro per l'identificazione (*c*). Si usa una tecnica mista di cromatografia e elettroforesi. Con il primo metodo di separazione i frammenti di proteina migrano sulla carta da filtro con una velocità che dipende essenzialmente dalla loro solubilità nel solvente impiegato. Piú sono solubili e piú velocemente migrano. L'elettroforesi è invece una migrazione entro un campo elettrico stabilito imponendo una differenza di potenziale tra le due estremità della carta. In questo caso la velocità di migrazione dipende dalla carica elettrica dei vari frammenti ed è normalmente diversa da quella ottenuta nella cromatografia. Si ha quindi una ulteriore separazione dei frammenti proteici. Infine si pongono i fogli di carta da filtro a contatto con una pellicola radiografica, che viene annerita nei punti in cui si trovano i frammenti marcati. Confrontando i risultati ottenuti nelle due condizioni, si vede che i frammenti marcati sono piú numerosi quando si danneggiano le cellule prima di marcarle. I frammenti *9*, *10*, *11* e *12* debbono appartenere a una zona della proteina che si affaccia sulla parte interna della membrana.

permeabilità per gli ioni potassio mediante valinomicina non si verifica quando si « congela » il doppio strato abbassando la temperatura. Inoltre la valinomicina deve legare gli ioni potassio in modo da impedire l'interazione tra lo ione carico e la regione non polare della membrana. Infine questa sostanza deve essere in grado di legare gli ioni potassio in maniera selettiva, escludendo gli ioni sodio e altri ioni.

Utilizzando la valinomicina come modello dei trasportatori biologici, si può pensare che il processo di trasporto dello ione potassio avvenga in tre fasi distinte: riconoscimento dello ione, diffusione attraverso la membrana e liberazione dello ione dalla parte opposta a quella in cui è entrato. Nella prima fase un « sito attivo » della molecola di valinomicina, che è legata alla membrana, cattura selettivamente lo ione potassio non appena si avvicina alla membrana. Nella seconda il complesso valinomicina-potassio diffonde attraverso la membrana lipidica. Infine, raggiunta l'altra superficie della membrana, il complesso si dissocia, liberando lo ione.

A questo punto si può riassumere il problema in poche parole. La struttura fondamentale delle membrane biologiche è costituita da un doppio strato lipidico. Questo costituisce una barriera che le piccole molecole idrofile possono attraversare solo con l'aiuto di un trasportatore. Inoltre la membrana deve spesso essere attraversata in maniera direzionale. Infatti, in una cellula normale, centinaia di specie chimiche facilmente diffusibili devono essere presenti all'interno della cellula in concentrazione superiore a quella del mezzo esterno. Per esempio, la concentrazione dello ione potassio nelle cellule umane è circa 100 volte superiore a quella nel sangue. Per lo ione sodio la situazione è capovolta. Il mantenimento di queste differenze di concentrazione è assolutamente necessario, anche piccole variazioni possono risultare letali.

Per quanto il modello basato sul funzionamento della valinomicina riesca a spiegare parecchie particolarità del trasporto mediante « carrier », esso non ci illumina per nulla su come potrebbe avvenire il trasporto di una sostanza da un punto in cui si trova a una certa concentrazione fino a un punto in cui si trova a concentrazione superiore. Il progresso verso la comprensione di questo meccanismo di concentrazione, che viene usualmente chiamato « trasporto attivo », è in gran parte dovuto ai lavori di Georges Cohen, Howard Rickenberg, Jacques Monod e dei loro collaboratori dell'Istituto Pasteur di Parigi. Questo gruppo di ricercatori ha studiato il trasporto del lattosio attraverso la membrana del batterio *Escherichia coli*. Precedenti esperimenti di genetica avevano fatto ritenere che il trasportatore del lattosio fosse una proteina. Lo studio della velocità di trasporto mostrò poi che il fenomeno seguiva le leggi di una reazione chimica catalizzata da un enzima, portando una conferma all'idea che il trasportatore fosse una proteina, come tutti gli enzimi. Il gruppo dell'Istituto Pasteur trovò anche che il trasporto del lattosio è un fenomeno di tipo attivo, potendosi produrre una concentrazione di zucchero all'interno della cellula 500 volte superiore a quella esterna. Il processo attivo di concentrazione richiede una spesa di energia, derivata dal metabolismo della cellula, infatti gli inibitori che bloccano il metabolismo fanno perdere alla cellula la sua capacità di concentrare lo zucchero.

Un modello che rende conto di molte caratteristiche del meccanismo di trasporto attivo del lattosio, postula l'esistenza di una proteina che può esistere in due strutture differenti. Questa proteina può essere visualizzata come

Questo è un possibile schema della struttura di una membrana cellulare. Il doppio strato fosfolipidico costituisce l'ossatura principale. Le masserelle grige sono costituite da proteine. In diversi casi piú proteine, come per esempio le cinque a sinistra, sono riunite in un complesso funzionale. Le proteine possono essere variamente disposte rispetto alla struttura fondamentale lipidica, trovandosi completamente all'interno o all'esterno oppure potendola attraversare interamente o parzialmente.

Il meccanismo del trasporto « attivo » può coinvolgere una proteina trasportatrice (*grigio scuro*) che funziona come una porta girevole. Il trasportatore cattura una sostanza S presente da un lato della membrana in soluzione diluita e la trasporta dall'altro lato, dove si trova in concentrazione maggiore. Quando S si lega alla proteina, questa cambia di forma (*1*) e quindi può ruotare su se stessa (*2*). Quando S si stacca (*3*) la proteina torna alla sua struttura di riposo. Si deve ora spendere dell'energia (*4*) per alterare la struttura della molecola e consentirle di tornare nella posizione iniziale (*5*).

una porta girevole nella compagine della membrana. Questa porta ha una forma che consente l'ingresso solo alla sostanza che deve essere trasportata (*si veda la figura in questa pagina*). La apertura della porta è normalmente rivolta verso l'ambiente esterno della cellula. Quando la sostanza da trasportare entra nella porta, la proteina cambia la sua struttura e può conseguentemente ruotare fino a portare l'apertura verso l'interno della cellula. Quando la sostanza cosí trasportata è stata scaricata all'interno della cellula, la proteina trasportatrice rimane rovesciata fino a che la cellula provvede l'energia necessaria per farla tornare nella posizione iniziale.

Lavorando con Eugene P. Kennedy alla Harvard Medical School nel 1965, sono riuscito a identificare il trasportatore del lattosio. Come ci attendevamo, trovammo che si trattava di una proteina capace di legare lo zucchero. Da allora sono stati isolati diversi altri trasportatori e tutti sono risultati essere delle proteine. Il trasportatore del lattosio è una molecola idrofoba, è quindi compatibile con la fase lipidica non polare della membrana.

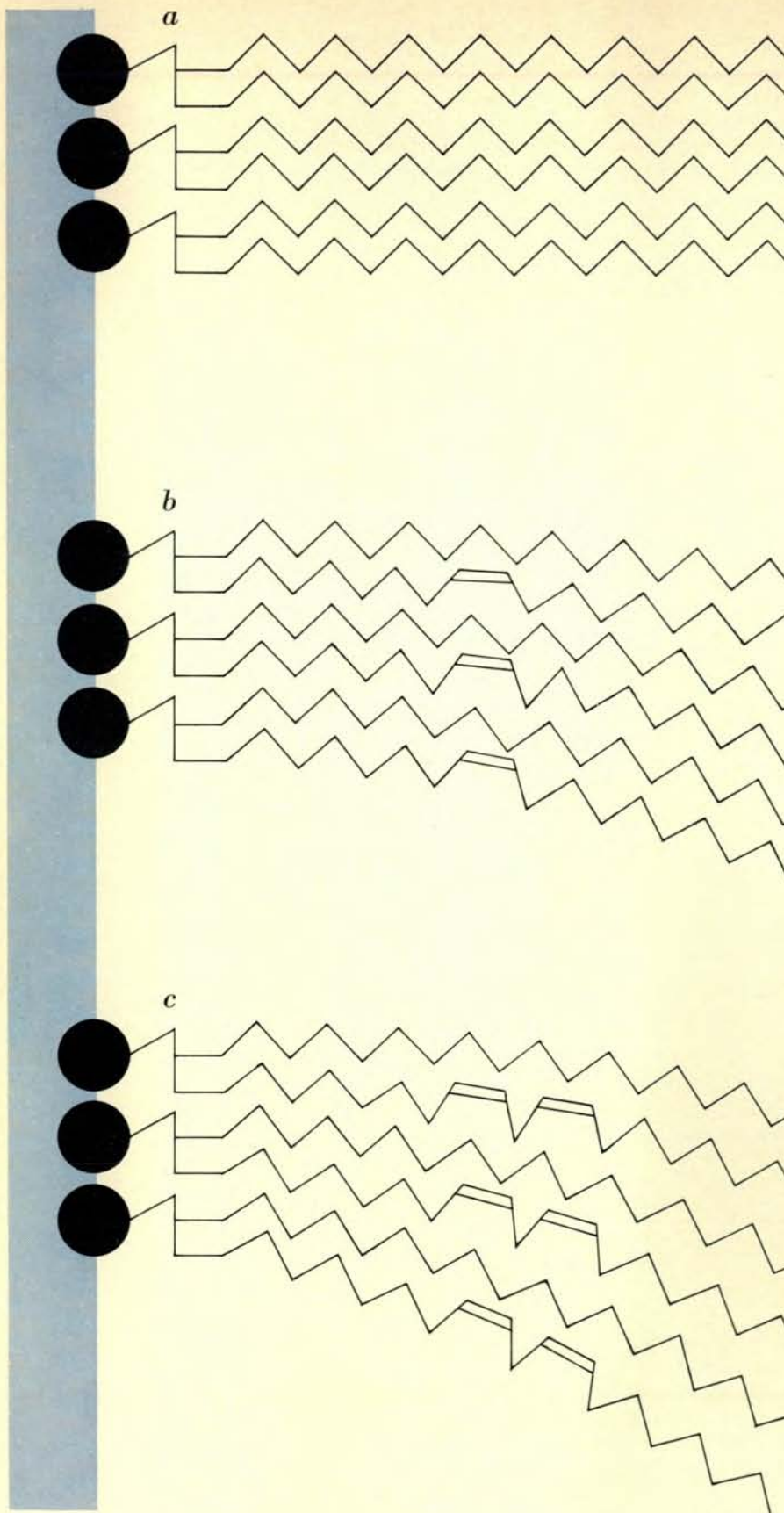
Dal momento che i trasportatori debbono potersi muovere all'interno della membrana per trasferire sostanze da un lato all'altro, si deve pensare che la regione della membrana che contiene le code non polari dei lipidi non può avere una struttura rigida di tipo cristallino. In effetti studi di diffrazione dei raggi X indicano che i lipidi entro le membrane sono organizzati come in un « cristallo liquido » a temperatura fisiologica, cioè intorno ai 37 °C.

Nelle membrane si trovano due tipi di acidi grassi; con catene cosiddette sature, in cui tutti i legami che possono formare gli atomi di carbonio della catena sono saturati con atomi di idrogeno, e con catene insature, nelle quali due o piú coppie di atomi di idrogeno vengono a mancare, con il risultato che i legami rimasti liberi si accoppiano, formando doppi legami tra gli atomi di carbonio. La fluidità del doppio strato lipidico delle membrane è dovuta in gran parte all'abbondanza relativa degli acidi grassi insaturi. Nei doppi strati fosfolipidici contenenti solamente catene sature, queste si allineano in un reticolo rigido a temperature fisiologiche. Se si aggiungono dei fosfolipidi con catene insature, la membrana diviene piú disordinata e quindi piú fluida. I doppi legami delle catene insature danno infatti origine a delle deformazioni che interrompono la struttura ordinata tipica dei reticoli cristallini rigidi (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

Con i miei collaboratori all'Università di Chicago (e poi all'Università di California a Los Angeles) e il gruppo di Peter Overath all'Università di Colonia, si è variata la composizione degli acidi grassi nelle membrane biologiche, per studiare gli effetti della loro struttura sul trasporto. Quando i lipidi delle membrane vengono arricchiti in acidi grassi insaturi, la velocità di trasporto può aumentare anche di 20 volte rispetto a quando sono piú poveri di questi acidi grassi. Questi esperimenti dimostrano che le normali funzioni delle membrane cellulari dipendono dalla fluidità delle catene non polari degli acidi grassi.

La temperatura alla quale le cellule vivono e crescono possiede un effetto notevole sulla quantità di acidi grassi insaturi presenti nelle loro membrane. Batteri coltivati a bassa temperatura possiedono membrane con una proporzione di acidi grassi insaturi maggiore dei batteri coltivati a temperature piú elevate. Questa variazione nella quantità di acidi grassi insaturi presenti nelle membrane è necessaria per assicurare una permeabilità sufficiente a basse temperature. Un fenomeno identico, oltre che nei batteri, si osserva anche negli animali superiori. Per esempio, nelle zampe della renna si ha un gradiente di temperatura, con valori piú elevati nella zona prossimale e piú bassi alla periferia. Per compensare tale gradiente, le cellule piú vicine agli zoccoli dell'animale hanno membrane ricche di acidi grassi insaturi.

Per quanto, come si è visto, i fosfolipidi possano formare spontaneamente dei doppi strati in sospensione acquosa, questo fenomeno ci fornisce solo una ragione in piú per ritenere che la struttura predominante nelle membrane cellulari sia costituita da un doppio strato fosfolipidico. La costruzione di una membrana cellulare è in realtà una cosa molto piú complicata. Le cellule degli organismi superiori contengono una quantità di strutture membranose particolari. Esse differiscono notevolmente come composizione lipidica e inoltre ognuna è completata da una serie caratteristica di proteine. La diversità delle proteine contenute nelle varie membrane e la loro differente collocazione rende conto delle loro diversissime caratteristiche funzionali. È raro trovare una medesima proteina in due diverse membrane.

Dal momento che tutte le proteine delle membrane vengono sintetizzate

Una variazione nella composizione degli acidi grassi può alterare l'ordine in cui i fosfolipidi si aggregano in una membrana. In uno strato lipidico contenente solo acidi grassi saturi, le catene idrocarburiche contengono solo legami semplici tra gli atomi di carbonio e si allineano in una struttura rigida. Sostituendo agli acidi saturi degli acidi insaturi con un solo doppio legame tra gli atomi di carbonio, che deforma la catena idrocarburica, si ha un'interferenza tra le varie catene che rende alquanto fluida la regione non polare della membrana. Introducendo acidi grassi con due doppi legami (*c*) si ha un'ulteriore distorsione della membrana, che diviene più fluida.

praticamente nello stesso punto della cellula, che cosa determina l'incorporazione di ognuna di esse nella giusta membrana? Attualmente si possono fare solo delle congetture, sostenute da pochi dati di fatto. Si fanno due ipotesi sul modo di costruire le membrane a partire dai componenti fondamentali. Una prima possibilità è che esista un meccanismo di autoassemblaggio, per cui i vari componenti vanno spontaneamente al posto che devono occupare nella membrana in formazione. Altrimenti può darsi che le proteine sintetizzate di fresco vadano a disporsi casualmente in una membrana preesistente.

Le ultime ricerche condotte nel mio laboratorio presso l'Università di California a Los Angeles e da Philip Siekevitz e George F. Palade presso la Rockefeller University concordano con la seconda delle due ipotesi. Questo va molto bene, ma perché una certa proteina viene incorporata solamente in un determinato tipo di membrana? Si può rispondere solo per congetture, ma, in ogni caso, è noto che molte proteine si legano specificamente ad altre proteine delle membrane. Queste interazioni tra proteine sono piuttosto frequenti e molte entità funzionali delle membrane sono costituite da insiemi di più proteine. Quindi le proteine presenti su una membrana possono costituire una struttura che viene riconosciuta da una proteina appena sintetizzata e ne facilita l'inserimento nella membrana stessa. In questo modo una membrana vecchia e in via di decadimento può fungere da modello per la costruzione di una nuova struttura. Questa ipotesi è in grado di spiegare perché le diverse membrane incorporino differenti proteine.

E allora perché i vari tipi di membrana hanno anche una differente composizione lipidica? La risposta a questa domanda è ancora più incerta. In generale i lipidi vengono sintetizzati entro la stessa membrana, però alcuni lipidi vengono prodotti da una membrana e vengono poi incorporati entro un'altra che non ha la possibilità di sintetizzarli. Dal momento, quindi, che esiste un interscambio di lipidi tra le varie membrane, sembra improbabile che le differenze nella composizione lipidica possano essere dovute a differenze nella capacità di sintesi da parte delle membrane stesse. Una risposta al problema può essere data ipotizzando che le membrane catabolizzino i vari lipidi con velocità differenti, oppure che siano in grado di legare selettivamente i diversi tipi di lipidi.

I modelli matematici e l'ambiente naturale

La grande complessità dei fenomeni naturali e l'influenza che su di essi hanno le attività umane possono essere studiate ricorrendo ai modelli matematici e agli elaboratori elettronici

di Renato Pennacchi

La Terra, nostra grande casa comune, non è una roccia inerte vagante nello spazio: è invece qualcosa di vivo, in perpetua evoluzione, attraversata da una fitta rete di arterie e capillari che la irrigano e di correnti aeree che la ossigenano, e che ospita una sterminata quantità d'organismi le cui possibilità di vita sono strettamente interconnesse e profondamente legate alle condizioni del pianeta su cui essi abitano. Il tutto in una sorta di equilibrio che s'è conservato attraverso i millenni.

Ora, in alcune zone della Terra, questo equilibrio è stato imprudentemente rotto, l'ambiente è stato alterato e, talvolta, al punto tale da far intravvedere un pericolo per le specie viventi e, implicitamente, per la stessa umanità.

Di qui, la viva attenzione che oggi gli uomini di governo e l'opinione pubblica dedicano, come mai nel passato, ai problemi di risanamento e miglioramento dell'ambiente naturale. Di qui l'improvviso passaggio alla piú ampia notorietà di termini, quali « ecologia » o « sistema ambientale », prima confinati entro una ristretta cerchia di specialisti.

Parallelamente allo sviluppo del comune interesse verso l'ambiente naturale, s'è diffusa la conoscenza di un'altra locuzione che sembra indicare uno dei mezzi piú efficienti per affrontare i problemi ecologici e ambientali: la modellistica, in generale, e l'uso dei modelli matematici, piú in particolare.

Il « vecchio » e il « nuovo ». Venezia e il calcolatore elettronico. I fenomeni naturali sono di complessità estrema dato che in essi intervengono innumerevoli variabili. Solo un calcolatore opportunamente programmato è in grado di elaborarle.

La nozione di modello e i principi di base per una concreta applicazione sono, in termini puramente intuitivi, tutt'altro che nuovi. Quando, nel VI secolo avanti Cristo, Pitagora tentava di scoprire e di definire la struttura dell'universo attraverso l'analisi di numeri che simboleggiavano e rappresentavano i corpi celesti e terrestri, in definitiva tentava di costruire un modello matematico dell'universo stesso, anche se sotto una luce assai piú magica ed esoterica che non scientifica e oggettiva.

Ma quando, nel 1930, l'astronomo Claude William Tombaugh riuscí a scoprire l'esistenza e l'orbita del pianeta Plutone in base alle differenze osservate da Lowell e Pickering tra la reale orbita di Nettuno e quella prevista da quel classico modello matematico del sistema solare che sono le equazioni della meccanica celeste, già il concetto di modello matematico s'era evoluto al punto da diventare un vero e proprio strumento d'indagine scientifica.

Tuttavia, il concetto di modello (in particolare, di modello matematico) è ben piú ampio che non la sola considerazione delle equazioni d'un fenomeno fisico. E s'è dovuti arrivare fino ai nostri giorni, nei quali sono stati sviluppati e definiti i fondamenti della teoria dei sistemi, per arrivare parallelamente a ben comprendere la nozione di modello e trarre da questa i frutti teorici e applicativi che era capace di dare.

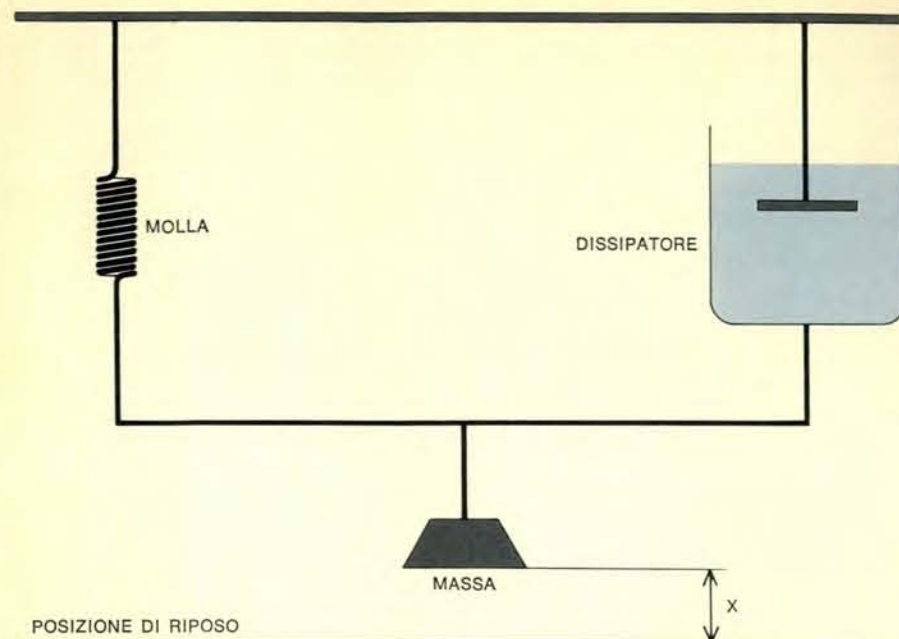
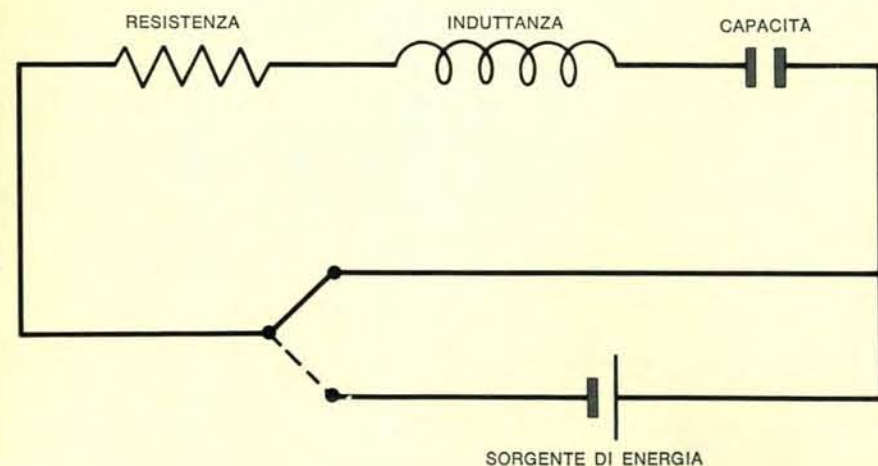
Prima, quindi, d'entrare nel merito delle applicazioni dei modelli matematici ai problemi ambientali, può esser di qualche utilità – almeno ai fini della chiarezza dell'esposizione – richiamarne qui i concetti basilari.

Modelli e sistemi

Allo scopo di evitare fin dall'inizio difficoltà e problemi di natura semantica, è bene precisare che la parola « modello » è stata adoperata senza alcuna implicazione d'ordine estetico o filosofico. Questo termine, di cui si darà nel seguito una definizione abbastanza precisa, anche se non proprio rigorosa, va inteso in connessione con il concetto – a esso strettamente correlato – di sistema. Il che equivale a dire che si parlerà specificatamente di « modello di un sistema » e, come casi particolari, si considereranno alcuni sistemi di maggior interesse nel campo delle scienze ambientali. Ciò in quanto, come si vedrà, un modello è esso stesso un sistema.

Purtroppo la parola « sistema » è assai ambigua, poiché a essa sono spesso associati molti significati diversi: basti pensare a locuzioni quali « sistema filosofico », « sistema nervoso », « sistema sociale », « sistema d'equazioni », ecc.

Analizzando bene qualche scritto, si può addirittura trovare che talvolta a questa parola non è associato alcun significato. Per non incorrere in questo pericolo, tenteremo di darne una definizione che sia sufficiente almeno al fine di poter esporre senza equivoci i concetti fondamentali attinenti ai modelli e alle loro applicazioni, specie nell'ambito delle scienze ambientali. Per questa definizione, seguendo gli studi

SISTEMA

MODELLO

EQUAZIONE

$$\frac{d^2X}{dt^2} = -\frac{1}{m}\left(h\frac{dX}{dt} + kX\right)$$

In un sistema, gli elementi costituenti interagiscono fra loro. Nel sistema in alto gli elementi sono la molla (con costante di elasticità k), il dissipatore (con costante di resistenza h) e la massa (m). Le reciproche interazioni sono costituite da forze e spostamenti. Il modello del sistema (*al centro*) è un altro sistema capace di riprodurre, col suo comportamento, il comportamento del sistema originario: nel caso sopra illustrato il modello è un sistema elettrico costituito da una resistenza, una capacità (pari a $1/k$) e una induttanza. Il comportamento del sistema è equivalente a quello del modello, se la descrizione è fatta mediante la variabile X (e le sue derivate prima e seconda rispetto al tempo) che nei due casi rappresenta, rispettivamente, lo scostamento dalla posizione di riposo e la tensione nel circuito. L'equazione (*in basso*) può considerarsi come un modello matematico del sistema originario e quindi del corrispondente modello.

di Ashby, Zadeh, Satsangi e altri, s'è rivelato particolarmente conveniente adottare un punto di vista insiemistico, anche se questo può sembrare alquanto complicato per chi non sia avvezzo a questo particolare tipo di strutture logiche.

Un tale modo di procedere è assai fecondo perché il concetto di sistema, definito secondo la visuale ora detta, assume una configurazione di grande generalità e, quindi, permette di abbracciare una vastissima classe di casi particolari che possono essere anche molto diversi fra loro.

È da osservare, anzitutto, che la caratteristica fondamentale di un sistema è quella di essere costituito da un certo numero di unità componenti, le quali sono fra loro in qualche modo connesse. Per questo, anche intuitivamente, si parla di « sistema planetario » o di « sistema economico di una nazione » e non si parla, invece, di « sistema dei granelli di sabbia che sono su una spiaggia ». Restano, per contro, assolutamente generali sia il tipo di unità componenti (o « elementi ») che compongono il sistema, sia il tipo di connessione che fra esse intercorre.

È quindi ragionevole dire che si ha un sistema quando si ha un insieme di elementi qualunque nel quale s'è definito un criterio univoco che associa fra loro questi elementi secondo un ben determinato tipo di connessione o di relazione.

Particolarizzando la definizione si verifica che, da questo punto di vista, una fabbrica è un sistema, perché è un insieme di unità operative (o, al limite, di uomini, macchine e materiali) in un rapporto di dipendenza reciproca tramite lo scambio di certi prodotti, o semilavorati o altro.

Similmente, il corpo umano è un sistema, perché può essere considerato come un insieme di organi (o, a un livello di maggiore finezza, di cellule) cui sono associati certi tipi ben definiti di interazioni.

Ed è anche un sistema il sistema solare, costituito dai pianeti, dai loro satelliti e dal Sole, cui sono associate le reciproche azioni gravitazionali; oppure l'insieme delle risorse idriche di un territorio (fiumi, laghi, mari, sorgenti, acque sotterranee, ecc.) le quali sono interconnesse fra loro mediante gli scambi derivanti dal bilancio idrico del territorio stesso. È chiaro che esempi di tal genere potrebbero moltiplicarsi a volontà, pur conservando sempre in comune il sottofondo astratto della definizione data.

Il modello

Una volta individuato in modo sufficientemente preciso il concetto di sistema, è agevole definire cosa sia un modello. Cominciamo col notare che lo scopo per il quale può aver interesse costruire il modello di un sistema è precisamente quello di creare un'analogia (e sarebbe piú esatto dire una corrispondenza) che permetta di comprendere le leggi secondo le quali il sistema si evolve e, se possibile, modificarle e migliorarle.

Ne segue che un modello d'un sistema non è che un altro sistema la cui struttura sia tale da permettere una corrispondenza senza ambiguità col sistema (o parti del sistema) che si vuole analizzare. Si adotta questa definizione di natura operativa perché fra i due sistemi si deve poter istituire una corrispondenza precisa, in modo tale che il comportamento d'uno di essi possa rappresentare e descrivere, con una data approssimazione, il comportamento dell'altro.

Analizzando bene questo modo di considerare le cose, si può osservare che esiste un certo riflesso del vichiano « verum factum » in questo procedimento di comprensione attuato per mezzo d'una attività che, in qualche maniera, è creativa.

Una volta definito, sia pure in forma intuitiva, cosa si intenda per modello, è facile riconoscere che, fra i vari possibili modelli d'un sistema, si può operare una suddivisione di base, secondo che il modello prescelto sia un sistema i cui elementi siano oggetti fisici oppure oggetti astratti di natura logico-matematica. Nel primo caso si suole parlare di « modello fisico », nel secondo caso di « modello matematico ».

È proprio a questi ultimi che oggi è particolarmente rivolta l'attenzione degli studiosi di scienza dei sistemi, specie in considerazione del fatto che l'evoluzione e il comportamento di un modello matematico possono essere studiati in modo agevole e rapido utilizzando quei meravigliosi manipolatori di oggetti logico-matematici che sono gli elaboratori elettronici. A questo tipo di modelli si farà costante riferimento nel seguito, con particolare riferimento alle loro applicazioni nell'ambito dei problemi posti dall'ambiente naturale.

I modelli nelle scienze ambientali

Da non molto tempo s'è diffusa, nella letteratura, la denominazione di « scienze ambientali » per indicare gli studi intorno alle condizioni fisiche e geomorfiche di un territorio.

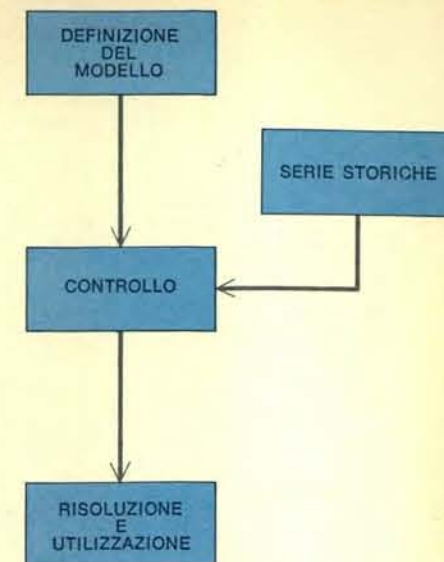
Si fanno usualmente rientrare nell'ambito delle scienze ambientali, per esempio, le indagini riguardanti la struttura e il comportamento dei bacini idrici, quelle relative ai livelli di inquinamento dell'aria e delle acque in una certa zona, quelle sui movimenti del suolo (di natura sismica o dovuti a cause meccaniche locali), ecc.

È chiaro che, in tutti i casi, si tratta di fenomeni estremamente complessi, governati da leggi spesso poco note e talvolta anzi del tutto ignote. Inoltre, assai spesso, i fenomeni stessi sono influenzati da fattori di natura aleatoria (come, per esempio, quelli connessi con gli eventi meteorologici) per i quali non è possibile stabilire un tipo univoco di evoluzione, neppure al livello di ipotesi teorica. Soprattutto in questi casi, la costruzione di un adeguato modello matematico sembra essere particolarmente fruttuosa. Tale costruzione viene normalmente realizzata attraverso diverse fasi.

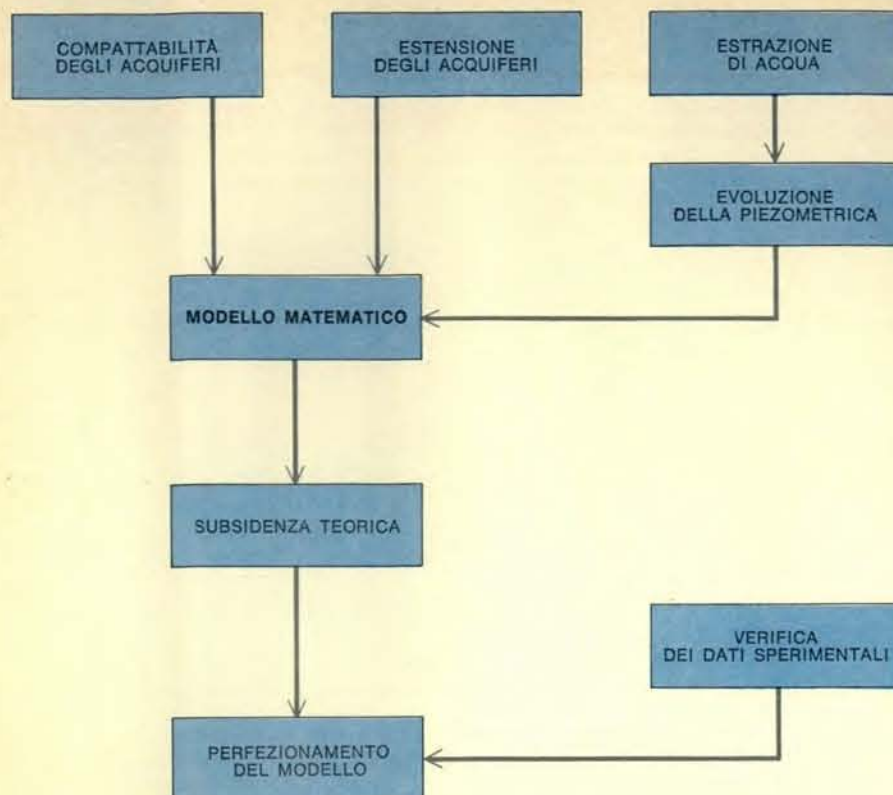
La prima di esse riguarda la definizione fisico-geometrica del modello. In questa fase, partendo da rilevazioni di natura topografica o fisica e da misurazioni sperimentali, vengono stabiliti senza ambiguità quei fattori che, nel loro insieme, sono atti a rappresentare, con una certa approssimazione, il sistema ambientale in esame. Fra questi fattori, che assumono il ruolo di parametri, si stabiliscono certe relazioni quantitative, dedotte da leggi naturali note o indotte probabilisticamente dall'analisi dei dati sperimentali rilevati nel passato ed elaborati statisticamente (le cosiddette « serie storiche »).

Una seconda fase è quella di controllo del modello. Questa fase è essenziale perché un sistema di parametri può essere riguardato come modello d'un sistema fisico solo se fra i due è possibile istituire una precisa corrispondenza. In pratica questa verifica viene attuata analizzando i dati delle serie storiche allo scopo di accertare che, almeno limitatamente alle variabili in esame, non si verifichino scostamenti di entità rilevante.

Terza e ultima fase è quella d'utilizzazione del modello. In questa, attraverso lo studio e la risoluzione del modello matematico, si rendono espliciti i valori di quei parametri che sono piú significativi e importanti per la comprensione dei fenomeni in esame e per un'attendibile previsione in merito alla evoluzione del sistema fisico.

Che tutto ciò non sia pura teoria o semplice speranza, ma piuttosto una tecnica feconda e attendibile, è dimostrato dalla grande quantità di applicazioni in atto in tutto il mondo.

La realizzazione di un modello matematico di un fenomeno naturale avviene, usualmente, attraverso un procedimento che consta di varie fasi. La prima richiede la conoscenza delle leggi fisiche che reggono il fenomeno in esame; le successive hanno lo scopo di controllare e accertare entro quali limiti d'approssimazione il modello prescelto rispecchia il fenomeno da analizzare. Solo dopo tali verifiche il modello può essere risolto e utilizzato.

Risultati interessanti sono stati infatti ottenuti in molti campi diversi: dai modelli idrologici per lo studio di bacini aventi dimensioni non oceaniche (Mar Baltico, Lago Michigan, Canale della Manica, Golfo del Messico, Golfo di California, Mare Adriatico, San Pablo Bay, ecc.), alle indagini sulla dinamica delle acque sotterranee (Musquodoboit Valley in Nuova Scozia, Laguna Veneta, Aquitania Occidentale, ecc.), all'analisi dei fenomeni di subsidenza (San Pedro di California, Venezia, Santa Clara Valley in California ecc.) o ai modelli per lo studio dell'inquinamento atmosferico (Chicago, New York, Brema, St. Louis, Washington, Milano, ecc.).

Un altro assai importante problema che sembra trovare nella teoria dei modelli un approccio assai promettente è quello dell'analisi della formazione delle onde di bufera (le tristemente note « storm surges ») e della previsione del loro comportamento. Ci sono, per esempio, studi di previsione per Atlantic City negli USA nei quali i valori di vento e di pressione sono correlati con i livelli delle acque oceaniche, e mo-

Il modello matematico per lo studio del fenomeno della subsidenza prende le mosse dai dati sulla compattabilità degli strati sotterranei, dai dati sulla estensione delle falde acquifere e dai dati sulle variazioni delle pressioni piezometriche. Si può in tal modo simulare l'andamento dello sprofondamento superficiale in funzione del tempo, verificandolo poi in base ai diversi dati sperimentali ricavati dalle osservazioni in loco.

delli analoghi relativi ai livelli dell'acqua a Venezia valutati in funzione delle condizioni meteorologiche nel bacino dell'Adriatico.

Un'applicazione dei modelli matematici

Come esempio di applicazione della teoria dei modelli a fenomeni di tipo ambientale, citeremo quanto è stato recentemente realizzato in Italia per opera del Centro di ricerca scientifica IBM di Venezia, che lavora in cooperazione col Laboratorio per lo studio della dinamica delle grandi masse, istituito dal CNR. Si tratta di un modello matematico del sottosuolo lagunare che prende in considerazione gli effetti dell'estrazione d'acqua dalle falde idriche sotterranee, in relazione all'abbassamento del livello del suolo.

Lo sprofondamento di Venezia e della zona circostante (comprendente anche Mestre e Marghera) è un dato di fatto ormai accertato e misurato: dai tre millimetri annui, che erano la quota media di abbassamento rilevata fino ad alcuni anni fa, s'è ora passati ai 7-8 millimetri all'anno, com'è dimostrato dai risultati dell'ultima livellazione recentemente effettuata.

Le differenze di livello, riscontrate in epoche diverse rispetto a punti fissi, provano l'esistenza di un fenomeno locale di abbassamento (o subsidenza), cui probabilmente si aggiunge l'effetto di un movimento di natura sismica di portata assai ampia dovuto a un bradisismo regionale.

Estrarre acqua dal sottosuolo attraverso pozzi artificiali è una pratica comune e assai antica: il terreno è considerato, sotto questo aspetto, come un immenso serbatoio d'acqua al quale l'uomo è solito attingere senza eccessive preoccupazioni. Ciò, in linea di principio, è ben giustificato perché, in condizioni normali, la riserva d'acqua viene naturalmente ripristinata attraverso l'apporto dato dalle acque piovane e dallo scambio idrico locale.

Da questo punto di vista, quindi, le caratteristiche idrologiche di un territorio si presentano come un sistema la cui struttura è naturalmente stabile, ossia tale da tender sempre a ritornare nel primitivo stato d'equilibrio, dopo l'intervento di una perturbazione. Ma, come sempre si osserva negli studi di stabilità dei sistemi, quando la perturbazione supera una certa soglia critica, allora intervengono modificazioni di natura qualitativa che impediscono il ripristino dello stato iniziale e il sistema subisce una vera e propria trasformazione.

Anche nel caso dell'estrazione d'acqua dai pozzi, quando il prelievo è eccessivo e supera le possibilità di arricchimento naturale, allora si verifica un fenomeno di depauperamento delle falde che, in pratica, consiste nella diminuzione della quantità d'acqua contenuta nei pori e nelle piccole cavità dei materiali costituenti il sottosuolo.

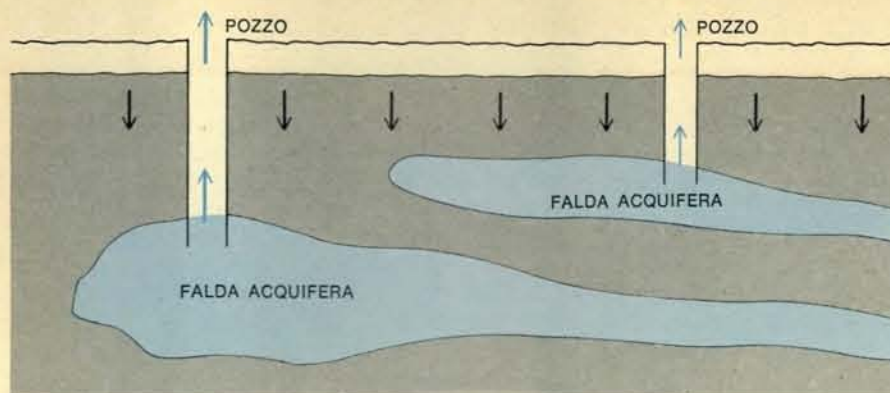
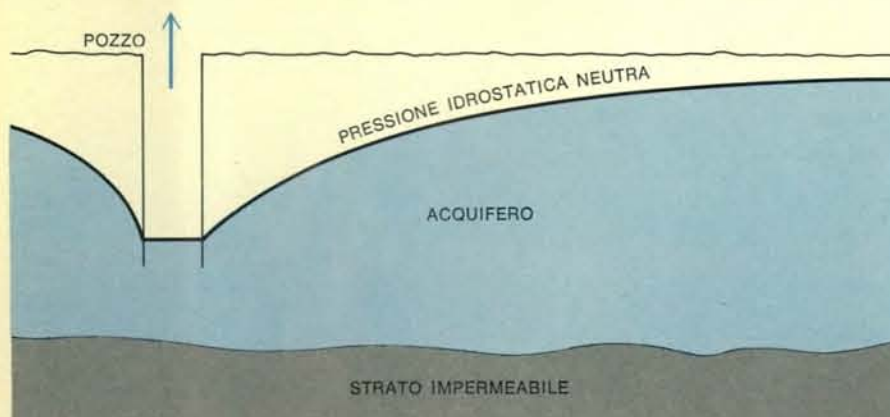
Come infatti dimostrano gli studi di numerosi scienziati (Poland, Davis, Gree, Geertsma e altri), l'estrazione di acqua o idrocarburi dal sottosuolo in quantità rilevante può dar luogo a un fenomeno di costipamento negli strati sotterranei interessati all'estrazione e, di conseguenza, a una subsidenza della superficie.

La letteratura riporta numerosi casi di preoccupanti sprofondamenti superficiali causati dalla estrazione di acqua o di oli minerali. Per questi ultimi ricordiamo le zone di Goose Creek nel Texas, di Wilmington in California o del Lago Maracaibo nel Venezuela dove, già da alcuni decenni, sono state osservate notevoli subsidenze. Casi più recenti, ma non meno rilevanti, sono gli sprofondamenti verificatisi nei giacimenti di Niigata in Giappone e nel Delta Padano.

Nel caso di estrazione di acqua, le aree interessate dalla subsidenza sono, in generale, di ampiezza notevole. Fenomeni di tal genere, dovuti all'impoverimento delle falde acquifere, sono stati riscontrati negli ultimi 50 anni nelle zone di Los Banos, Santa Clara Valley, Tuba-Wasco e San Joaquin Valley in California, a Città del Messico, a Huston-Galveston nel Texas e, come ben noto, in Italia a Venezia.

Lo scopo del modello matematico del sottosuolo (che è un modello integrato idrologico-subsidenziale) è quello di correlare in termini quantitativi, la subsidenza con il grado d'impoverimento delle falde e dei giacimenti.

Il fondamento teorico di tale modello è costituito dalla scienza del sottosuolo, i cui sviluppi sono relativamente recenti e prendono le mosse dai lavori di Karl Terzaghi che fin dal 1925 introdusse il principio dello « sforzo intergranulare effettivo ». Questo principio riconosce che ogni forma di costipamento è dovuta unicamente a variazioni delle forze che operano fra i granuli costituenti i terreni, e fornisce un criterio assai semplice di valutazione. Esso, infatti, stabilisce che la pressione geostatica δ_c a una qualunque profondità, è legata allo sforzo (o tensione) intergranulare effettivo δ_z e alla

Come mostrano queste fotografie, e in particolare quella in basso, la laguna veneta è un sistema assai complesso, i cui elementi sono di natura idrica (canali, barene, falde acquifere, ecc.), geologica (strati sotterranei, struttura topografica) e atmosferica. Presso il Laboratorio del CNR per lo studio della dinamica delle grandi masse e, congiuntamente, presso il Centro di ricerca scientifica IBM di Venezia sono in atto studi tendenti alla costruzione di modelli matematici capaci di fornire una descrizione dei vari fenomeni che interessano la laguna veneta. Progetti di ricerca assai avanzati riguardano un modello per la previsione dei livelli d'acqua a Venezia, un modello bidimensionale della laguna e un modello per lo studio della subsidenza.

Il fenomeno della subsidenza è ovviamente un fenomeno generale che non si riscontra soltanto a Venezia, ma in molte altre località in Italia e nel mondo. Applicando la teoria sviluppata da K. Terzaghi, il modello subsidenziale permette di calcolare il valore della tensione intergranulare effettiva da cui è poi possibile risalire al calcolo dello sprofondamento superficiale. Il meccanismo del fenomeno, tramite il quale si giunge al modello matematico, poggia infatti sulla considerazione che la superficie è in equilibrio tra l'azione del suo peso e l'azione delle pressioni esistenti nel sottosuolo.

L'emungimento di acqua attraverso pozzi (così come talvolta l'estrazione di idrocarburi) provoca un abbassamento della pressione idrostatica neutra, con incremento della tensione intergranulare effettiva con conseguente costipazione degli strati sotterranei.

pressione idrostatica neutra p (così detta perché non provoca, di per sé, fenomeni di costipamento) del fluido contenuto nei pori, dalla relazione:

$$\delta_c = \delta_z + p.$$

Questa semplice relazione è sostanzialmente una legge sperimentale, oggi universalmente accettata (come dimostrato dai lavori di Mainzer, Hard e altri) e considerata uno dei fondamenti della moderna teoria del consolidamento dei terreni.

In base alla relazione di Terzaghi, l'estrazione d'acqua dal suolo, se in quantità rilevante, provoca un impoverimento delle falde acquifere con conseguente diminuzione della pressione neutra e quindi un incremento della tensione effettiva in quanto la pressione geostatica resta generalmente costante.

Che questa teoria possa applicarsi alla costruzione di modelli matematici atti al calcolo della subsidenza provocata dall'emungimento degli acquiferi è stato dimostrato, sia pure in forma non generale, da Poland e Domenico in recenti pubblicazioni, mentre l'US Geological Survey ha promosso un progetto di ricerca sulla valutazione teorica della subsidenza (basata sulla teoria di Terzaghi) che ha fornito risultati assai incoraggianti soprattutto a opera di Lofgren e di Klausing.

Un secondo interessante tentativo è quello già prima citato, di G. Gambolati, relativo alla valutazione della subsidenza in Venezia, ancora basato sulla relazione di Terzaghi. In quest'ultimo caso, la principale difficoltà è costituita dalla corretta stima delle tre variabili precedentemente citate. Il riconoscimento di questa difficoltà ha condotto alla necessità della considerazione d'un modello integrato, ossia d'un modello che risolva in primo luogo il problema del flusso di acqua nel sottosuolo e fornisca adeguati valori per la pressione idrostatica neutra, e quindi utilizzi questi valori per valutare l'abbassamento superficiale.

La prima parte di questo modello integrato è quindi, sostanzialmente, costituito dalle equazioni differenziali della diffusività accompagnate da appropriate condizioni iniziali e al contorno. In pratica, attraverso le tecniche offerte dalla geologia applicata è possibile individuare i bacini acquiferi regionali e le loro caratteristiche essenziali che intervengono nel modello come parametri, e precisamente la struttura geologica, i piani di scorrimento dei fluidi, le linee spartiacque, le permeabilità orizzontali e verticali, la conduttività delle falde e la comprimibilità degli strati. È, inoltre, compito del geologo la determinazione delle condizioni al contorno ossia la definizione dei confini naturali del bacino, la valutazione delle quantità di acqua che vi entrano o escono e i valori del potenziale sul bordo.

La relazione fondamentale del modello poi, definisce la relazione che collega fra loro il carico piezometrico (o potenziale idraulico); le tre componenti della permeabilità lungo i tre assi; la comprimibilità equivalente della formazione (che tiene conto sia della comprimibilità naturale del sottosuolo, sia della comprimibilità del fluido); la densità di prelievo nei pozzi di estrazione e la variabile temporale.

Sfortunatamente questa relazione fondamentale è un'equazione differenziale alle derivate parziali, la cui risoluzione non può essere effettuata mediante i metodi analitici che la matematica classica offre. È quindi necessario far ricorso a tecniche avanzate d'analisi numerica che permettono di ricavare sotto forma tabellare la riduzione del carico piezometrico in una determinata zona (e quindi quella della pressione idrostatica) in funzione d'una certa distribuzione di pozzi e di dati quantitativi d'acqua estratta. Le variazioni della pressione idrostatica così determinate vengono poi impiegate nel vero e proprio modello del sottosuolo o modello subsidenziale.

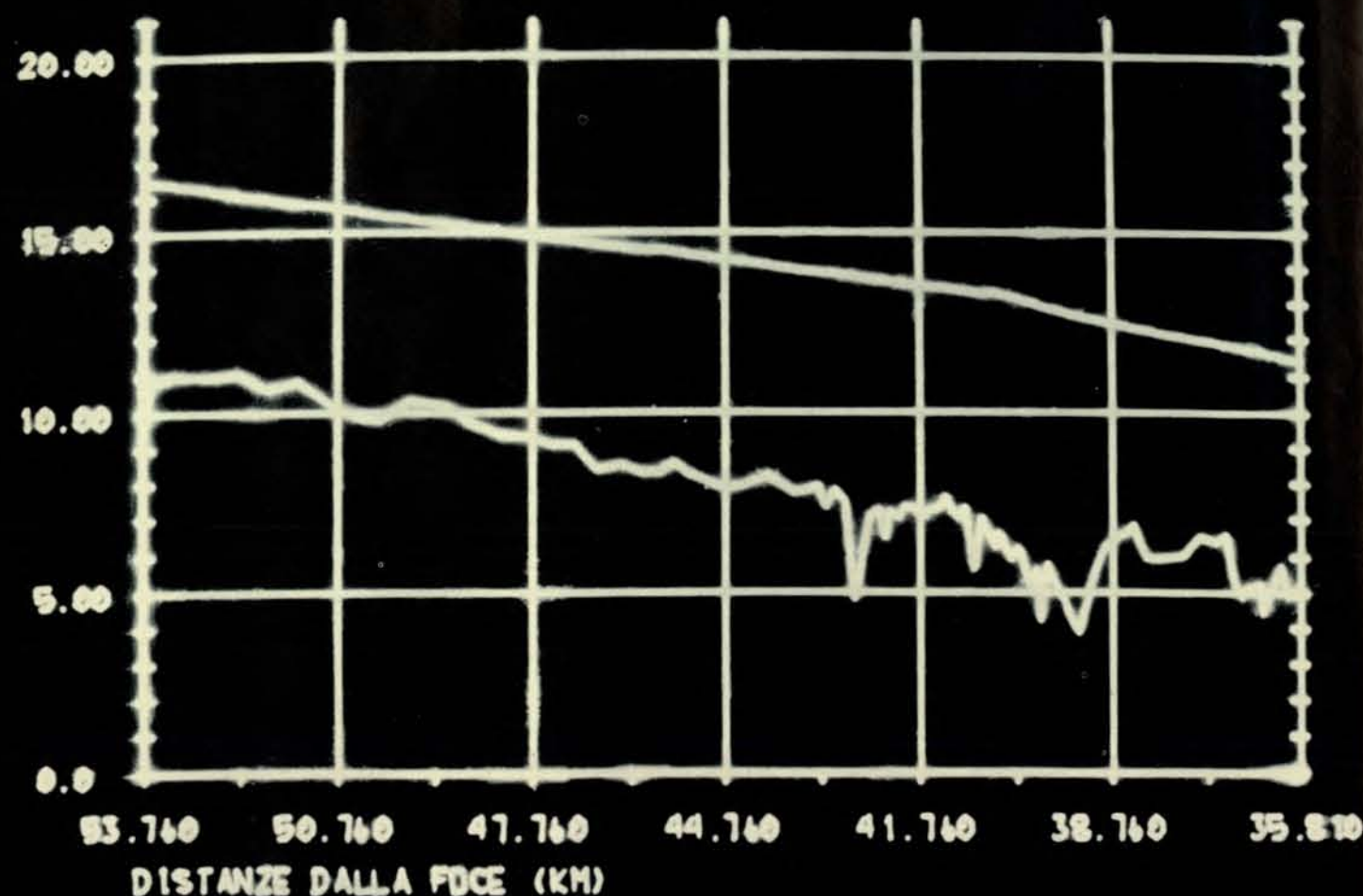
In questo la relazione di Terzaghi giuoca il ruolo di equazione fondamentale, una volta che sia stata determinata la variabile pressione geostatica mediante la rilevazione della porosità e del peso specifico dei granuli in funzione della profondità.

In particolare, per gli strati di natura argillosa, il cui contributo alla subsidenza è preponderante, l'equazione del modello si presenta, anch'essa, nella forma di equazione differenziale alle derivate parziali nella quale interviene il coefficiente di consolidamento, anch'esso da determinare sperimentalmente. Finalmente, una volta ottenuta la tensione intergranulare effettiva, è possibile calcolare la compattazione η di uno strato di spessore S e di qui, sommando le compattazioni di tutti gli strati sovrapposti che hanno subito mutamenti, il valore della subsidenza in superficie. Si realizza, in tal modo, un sistema di relazioni matematiche che, in funzione della variabile temporale, fornisce una serie di valori numerici capaci di rappresentare con il loro andamento il comportamento dell'altro ben più complesso sistema che è il sottosuolo di una zona terrestre così ampia e diversificata.

Il bacino dell'Arno costituisce un sistema idrico di dimensioni molto ampie che si estende, nella sua parte terminale, su un territorio completamente piano e avente scarsissima pendenza. Ciò rende assai probabili i traboccamenti e di difficile valutazione l'efficacia di opere ingegneristiche atte a migliorare il deflusso delle acque che scorrono addirittura su un letto pensile.

Un altro esempio di applicazione

Come secondo esempio di applicazione dei modelli matematici ai problemi

Sul terminale video di un calcolatore elettronico vengono presentati i dati relativi a una piena dell'Arno del 1949. Il video mostra come l'onda di piena, calcolata in base ai dati misurati a monte, coincida quasi esattamente con quella misurata.

ambientali vorremmo qui citare lo studio intorno all'Arno, studio che ha tratto origine dal ricordo dei tristi giorni del novembre 1966 quando Firenze, Pisa e numerose altre località furono sconvolte dal fiume in piena.

Il problema ha origini assai remote: riferendosi soltanto alle inondazioni subite dalla città di Pisa, di cui si hanno fonti storiche attendibili a partire dal XII secolo, possono annoverarsi ben 58 inondazioni, di cui 4 in questo secolo. Tuttavia gli sforzi e le risorse tecniche di volta in volta impiegate non sono riusciti a evitare il ripetersi dei fenomeni alluvionali.

Fra le cause principali di queste ricorrenti catastrofi, si possono considerare, oltre alla stessa vastità del bacino orografico le cui acque convergono nel fiume Arno, l'altissima quantità di detriti depositati nel letto del fiume durante ogni piena e l'estrema piattezza della pianura pisana: basti pensare che la città di Pisa, che dista dalla foce appena una decina di chilometri, ha una quota di soli tre metri sul livello del mare. In questa situazione, la parte terminale del fiume è prevalentemente pensile, ossia col letto posto al di sopra della pianura circostante e delimitato dagli argini. È ovvio come tutto ciò possa facilmente dar luogo a traboccamenti: ne è una riprova l'esistenza, nel passato con residui tuttora esistenti, di ampie paludi distribuite lungo il corso del fiume e agenti come polmone durante le ricorrenti alluvioni.

Si è cercato, nei secoli passati, di risolvere questo problema sia rinforzando gli argini, sia costruendo opere idrauliche, talune anche assai ingegnose e ardite. Per esempio, si è tentato di rettificare il corso del fiume per aumentarne la pendenza, ma con la conseguenza di aumentarne la velocità e quindi l'effetto corrosivo e di riporto; oppure costruendo canali scolmatori capaci di sottrarre una parte dell'acqua al bacino principale, convogliandola direttamente al mare; oppure anche allestendo bacini di scarico sul tipo delle antiche preesistenti paludi, nelle zone di piú frequente inondazione.

Il moderno approccio fondato sulla tecnica modellistica presenta, rispetto a quanto fatto nel passato, la sostanziale differenza di permettere una valutazione a priori in merito alla efficacia dell'opera progettata. Il modello del bacino fluviale è fondato sull'analisi di tre gruppi di dati: 1) la descrizione geometrica e topografica del fiume; 2) le serie storiche inerenti ai dati delle precedenti inondazioni; 3) i parametri atti a descrivere il comportamento del fiume dal punto di vista idraulico.

Questi dati si correlano fra loro mediante il loro inserimento nelle leggi dell'idraulica che costituiscono, quindi, la struttura logico-matematica del modello stesso. In particolare, il modello in studio a Pisa si compone di due sezioni idealmente separate: una prima, atta all'analisi della formazione dell'onda di piena come conseguenza di eventi meteorologici; una seconda, che riguarda l'evoluzione dell'onda lungo il corso d'acqua e della sua interazione con le onde di piena degli affluenti.

Le relazioni che descrivono la propagazione di un'onda di piena in un corso d'acqua furono stabilite, da Barre de Saint-Venant, nella seconda metà del secolo scorso. La prima di esse (la cosiddetta « equazione di continuità ») fornisce un legame fra l'area della sezione bagnata, la portata in ogni sezione di data ascissa e il contributo laterale lungo il tratto considerato. Questi parametri sono considerati come variabili nel tempo e il loro legame è di natura differenziale.

La seconda relazione (la cosiddetta « equazione dinamica »), invece, esprime il bilancio energetico fra le masse d'acqua interessate, ossia prende in considerazione le velocità della corrente, la pendenza del fiume nel tratto considerato e la perdita di carico dovuta all'attrito. Quest'ultimo dato, in particolare, costituisce argomento di grande interesse data la notevole difficoltà di una sua precisa valutazione. Infatti, poiché per i fiumi la natura dell'alveo è in generale molto variata e non omogenea, non è possibile calcolare sperimentalmente la perdita per attrito ed è necessario tentare di esprimerla in funzione di altri elementi di piú agevole misurazione. Un metodo largamente accettato per il suo calcolo è basato sull'uso di una formula (formula di Manning) secondo la quale la perdita di carico per unità di lunghezza dipende dalla velocità della corrente, da una conveniente grandezza geometrica lineare della sezione considerata e da un coefficiente che dipende a sua volta dalla natura e dalla costituzione fisica dell'alveo, detto « coefficiente di scabrezza ».

Il punto piú delicato del calcolo, come si vede, consiste proprio nella valutazione del coefficiente di scabrezza, il quale racchiude globalmente in sé, per cosí dire, tutti gli elementi che non è possibile analizzare specificamente e separatamente. La tecnica utilizzata per la determinazione del coefficiente di attrito è basata sull'impiego delle serie storiche. Il valore del coefficiente di scabrezza si ottiene, infatti, facendolo variare a guisa di parametro libero in modo tale da far coincidere i dati forniti teoricamente dal modello con quelli forniti sperimentalmente dalle misurazioni. Purtroppo ciò non può essere ottenuto con una sola determinazione, dato che i valori del coefficiente di scabrezza calcolati a partire da dati storici diversi differiranno, in generale, fra loro. Occorre quindi allargare l'indagine calcolando il profilo del pelo libero dell'acqua in un certo numero di sezioni e determinando poi il coefficiente d'attrito per tutti i tratti compresi fra due sezioni contigue.

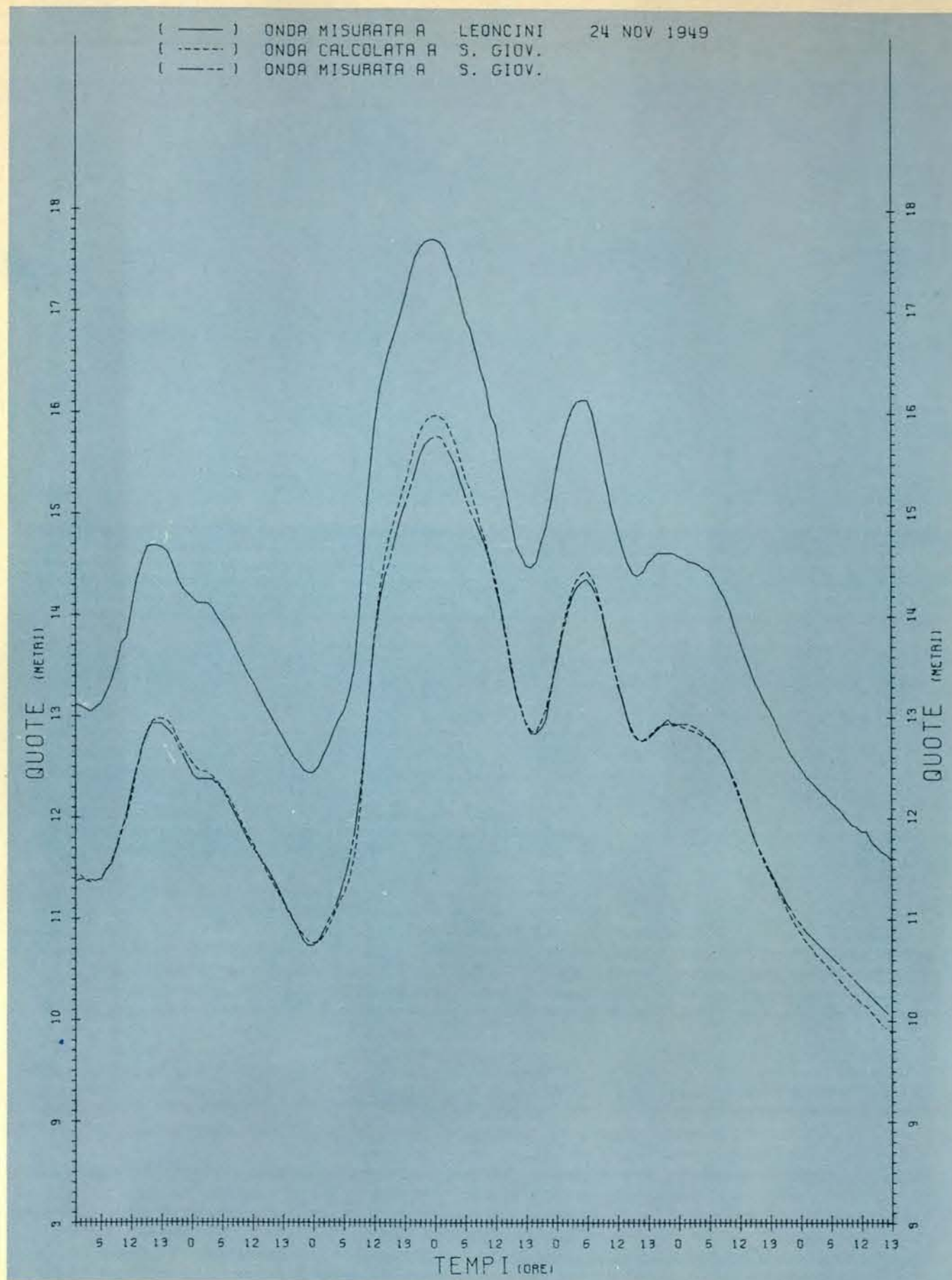
Una volta determinato, in tal modo, il coefficiente d'attrito, è possibile analizzare il comportamento del fiume, simulando diverse condizioni, allo scopo di pervenire a una valutazione quantitativa dell'influenza che può avere la variazione d'una sezione o la presenza di eventuali nuove opere ingegneristiche.

L'altra sezione del modello, da considerarsi a monte rispetto a quella testé descritta, riguarda la formazione dell'onda di piena in conseguenza di eventi meteorologici.

Lo schema logico su cui è costruita questa parte del modello è sostanzialmente il seguente. Si considera, in un bacino imbrifero, una superficie dS sulla quale cade una pioggia d'intensità $h'(t)$ nel tempo dt: in tali ipotesi il volume di precipitazione è dato da

$$dW = h'(t)dtdS.$$

Di questo volume, una parte evapora o è in qualche modo trattenuta, una parte si infiltra nel terreno e il resto defluisce e abbandona la superficie secondo una linea, la cui forma dipende dalla pendenza e dagli ostacoli presenti sul terreno. Inoltre, l'acqua non lascia istantaneamente la superficie appena toccato il suolo, ma piuttosto darà luogo a un fenomeno analogo a ciò che avviene in un serbatoio che si riempie secondo una certa legge mentre si vuota con una legge diversa.

Se poi si vuole correlare il volume d'acqua di precipitazione con la portata del fiume in una certa sezione occorrerà considerare il tempo necessario perché una goccia d'acqua caduta sulla superficie considerata raggiunga tale sezione (tempo di corrivazione). Naturalmente, è chiaro che non è possi-

Questo grafico, tracciato direttamente da un calcolatore, mostra l'andamento, in funzione del tempo, di un'onda di piena del fiume Arno verificatasi nel novembre 1949. La curva a tratto continuo rappresenta i livelli realmente misurati, quella tratteggiata i livelli calcolati servendosi del modello. Gli scostamenti che si osservano dipendono sia dalle approssimazioni assunte nella costruzione del modello, sia dalla necessità di utilizzare metodi puramente numerici nell'integrazione delle equazioni risultanti.

bile seguire specificatamente quella singola goccia attraverso tutte le sue peregrinazioni; ha tuttavia significato supporre che due gocce, cadute nello stesso punto, seguiranno percorsi di poco differenti fra loro e che la quantità di acqua che giungerà alla sezione presa in esame dipenderà solo dalle caratteristiche generali della pioggia.

Si può quindi adottare un coefficiente k, che tiene conto sia del deflusso reale in dS sia delle perdite che possono aversi lungo il percorso e che rappresenta la percentuale del volume di precipitazione dW che cade sulla superficie considerata e raggiunge poi la sezione presa in esame. In definitiva, quindi, il coefficiente k dipende dalla posizione di dS, dall'indice di imbibizione del suolo all'inizio della pioggia, dalla altezza $h(t)$ della pioggia caduta su dS al tempo t, dalla intensità della pioggia stessa, definita come la derivata prima di $h(t)$ rispetto al tempo, e dal tempo τ.

Questa teoria, elaborata da Sherman, Roche e altri, permette di pervenire a una espressione integrale che fornisce la portata totale defluente e che costituisce il modello del bacino.

Conclusioni

Gli esempi che abbiamo sommariamente descritto sono, come appare evidente, appena sufficienti per illustrare con chiarezza le possibilità offerte dalla tecnica dei modelli matematici nello studio dei problemi ambientali.

Ci conforta, peraltro, la speranza che essi siano serviti almeno a dare un'idea del genere di studi che sono connessi con questo tipo di problemi e dell'utilità di questa tecnica. La quale è ancora ben lungi dall'aver subito quella sistematizzazione formale che, un giorno, potrà strutturarla in una vera e propria nuova scienza; del che già fin d'ora appare qualche primo accenno. È tuttavia importante che oggi una complessa e vasta classe di problemi, prima affrontabile solo in modo empirico, possa ora essere attaccata con spirito razionale e atteggiamento scientifico.

Quell'atteggiamento per cui i risultati raggiunti possono sempre essere annoverati fra i dati definitivamente acquisiti e possono costituire il punto di partenza per altri studi, verso nuove mete, in una sorta di additività degli sforzi, nell'intento di perfezionare sempre piú quell'imponente costruzione che si chiama conoscenza scientifica del mondo.

FISICA

Fin dai suoi primi numeri, **LE SCIENZE** *, edizione italiana di* **SCIENTIFIC AMERICAN** *, ha dato particolare rilievo ai settori della fisica che hanno oggi il maggiore sviluppo. Già sul n. 1, K.S. Pennington ha illustrato per i nostri lettori i piú recenti progressi in olografia, una tecnica basata sul laser che permette di ottene immagini tridimensionali, mentre nell'articolo « Le tre spettroscopie » F.V. Weisskopf ha fatto il punto sulle piú recenti teorie nel campo delle particelle elementari. Inoltre, nel settore che sta a cavallo tra fisica e tecnologia, parecchi articoli sono stati dedicati ai laser e al problema della produzione di energia mediante reattori nucleari di tipo avanzato.*

Altre importanti messe a punto nel settore della fisica pura sono:

Cristallografia a raggi X
di L. Bragg (n. 3)

Gli elementi sintetici
di G.T. Seaborg e J.L. Bloom (n. 12)

Tracce nucleari nei solidi
di R.L. Fleischer, P.B. Price e R.M. Walker (n. 13)

Particelle piú veloci della luce
di G. Feinberg (n. 21)

Il "secondo suono" nell'elio solido
di B. Bertman e D.J. Sandiford (n. 24)

Acceleratori tandem di Van de Graaff
di P.H. Rose e A.B. Wittkower (n. 27)

Le costanti fisiche fondamentali
di B.N. Taylor, D.N. Langenberg e W.H. Parker (n. 29)

I campioni di unità di misura
di Michelangelo Fazio (n. 31)

Il fenomeno della diffusione termica
di Francesco S. Gaeta (n. 34)

A problemi piú strettamente fisico-tecnologici sono dedicati gli articoli:

Condotti di calore
di G.Y. Eastman (n. 2)

Il controllo delle vibrazioni e dei rumori
di T.P. Yin (n. 10)

Metalli liquidi
di N.W. Ashcroft (n. 14)

Nuovi metodi per avvicinarsi allo zero assoluto
di O.V. Lounasmaa (n. 19)

Luce e strati monomolecolari
di K.H. Drexhage (n. 24)

Rappresentazione di immagini mediante elaboratore
di I.E. Sutherland (n. 25)

I reattori convertitori veloci
di Glenn T. Seaborg e Justin L. Bloom (n. 30)

I magneti permanenti
di Joseph J. Becker (n. 30)

Le prospettive dell'energia di fusione
di William C. Gough e Bernard J. Eastlund (n. 33)

Fisiologia della meditazione

Lo stato di meditazione che viene raggiunto dai praticanti yoga e da altri mistici orientali è accompagnato da variazioni fisiologiche? Uno studio condotto su volontari negli Stati Uniti ha dato una risposta affermativa

di Robert Keith Wallace e Herbert Benson

In che modo l'organismo umano è in grado di adattarsi a delle variazioni ambientali psicologicamente dannose? L'era della tecnologia sta mettendo alla prova questa capacità piú di quanto non sia mai stato fatto nel passato. L'effetto dei rapidi cambiamenti – senza precedenti per entità, complessità e novità – che la tecnologia sta producendo nel nostro mondo sembra essere deleterio per la salute mentale e fisica dell'uomo moderno. Alcuni dei disturbi comuni del nostro tempo, in modo particolare « la nevrosi gastrica » e l'alta pressione sanguigna si possono in parte attribuire al clima di incertezza che caratterizza il nostro ambiente e la vita quotidiana. Poiché è improbabile che l'ambiente si sviluppi in modo meno complesso o piú prevedibile, la sola cosa da fare è portare avanti le ricerche sulle risorse che il corpo umano ha per far fronte a ciò che avviene nell'ambiente.

Ci sono infatti molti modi mediante i quali un individuo può controllare le sue reazioni fisiologiche di fronte a eventi psicologici. Tra questi, i piú importanti per un simile controllo provengono da certe pratiche di meditazione orientali: lo yoga e il buddismo Zen. Questo articolo passerà in rassegna e discuterà studi recenti sugli effetti della meditazione fatti da noi e da altri ricercatori.

Da lungo tempo in India si ritiene che coloro che praticano lo yoga siano in grado di fornire prestazioni al di fuori della norma, come arresto volontario del battito cardiaco o sopravvivenza per lunghi periodi in un ambiente molto ristretto, chiuso e a tenuta d'aria, o al freddo molto intenso senza cibo o con il corpo in una posizione contorta. Uno dei primi ricercatori che studiò questi fatti in modo oggettivo fu la cardiologa francese Thérèse Brosse, che andò in India nel 1935 munita di un elettrocardiografo portatile in modo da poter registrare l'attività cardiaca di alcuni soggetti. La Brosse concluse, dalle sue prove, che uno dei soggetti esaminati era veramente in grado di arrestare il proprio cuore. Nel 1957 due fisiologi americani, M. A. Wenger dell'Università della California a Los Angeles e B. K. Bagchi della Facoltà di medicina dell'Università del Michigan, condussero una piú vasta ricerca in collaborazione con B. K. Anand dell'All-India Institute di scienze mediche di New Delhi. Nessuno dei praticanti yoga da essi presi in osservazione con apparecchiature molto piú elaborate di quelle usate dalla Brosse, si mostrò in grado di arrestare il proprio cuore. Wenger e Bagchi conclusero che la scomparsa del segnale dell'attività cardiaca nell'elettrocardiogramma della Brosse era probabilmente un artefatto, in quanto l'impulso cardiaco può essere talvolta coperto da segnali elettrici dovuti a una contrazione dei muscoli del torace. (Nel tentativo di arrestare il cuore, i praticanti yoga di solito compiono la cosiddetta manovra di Valsalva che fa aumentare la pressione intratoracica e può essere eseguita trattenendo il respiro e piegandosi in basso con sforzo.) Wenger, Bagchi e Anand trovarono tuttavia che alcuni praticanti yoga potevano rallentare sia la velocità del battito cardiaco che quella della respirazione.

I rapporti di numerose altre ricerche condotte negli anni 1959 e 1960 indicano che la meditazione, cosí come viene praticata nello yoga o nello Zen, potrebbe produrre una serie di effetti fisiologici. Uno degli effetti dimostrati era la riduzione della velocità del metabolismo. Esaminando, in Giappone, dei monaci Zen che avevano molti anni di esperienza nella pratica della meditazione profonda, Y. Sugi e K. Akutsu trovarono che, durante la meditazione, in questi soggetti il consumo di ossigeno diminuiva di circa il 20 % e diminuiva anche la produzione di anidride carbonica. Questi segni naturalmente provano un rallentamento del metabolismo. A New Delhi, Anand e due suoi collaboratori, G. S. Chhina e Baldeu Singh, fecero una scoperta analoga esaminando un praticante yoga; rinchiuso in una cassa di metallo sigillata, il soggetto riduceva notevolmente il suo consumo di ossigeno e l'eliminazione di anidride carbonica.

Queste prove indicavano chiaramente che la meditazione produce i suoi effetti mediante il controllo di un meccanismo « involontario » del corpo, probabilmente del sistema nervoso autonomo. La riduzione dell'eliminazione di anidride carbonica si sarebbe potuta spiegare come un'azione chiaramente volontaria del soggetto – rallentamento della respirazione – ma tale azione non dovrebbe influenzare notevolmente l'assunzione di ossigeno da parte dei tessuti corporei. Di conseguenza era ragionevole supporre che la caduta del consumo di ossigeno, che rispecchia una diminuzione della necessità di ossigeno inspirato, deve essere dovuta alla modificazione di un processo che non è soggetto a una manipolazione intesa nel senso corrente.

Le ricerche con l'elettroencefalografo mostrano che la meditazione causa delle variazioni nell'attività elettrica del cervello. In studi condotti su monaci Zen, A. Kasamatsu e T. Hirai dell'Università di Tokyo trovarono che durante la meditazione a occhi socchiusi, nei monaci si sviluppavano in predominanza onde alfa – le onde che ordinariamente predominano quando una persona è completamente rilassata con gli occhi chiusi. Durante la meditazione nei monaci le onde alfa aumentavano in ampiezza e regolarità, particolarmente nelle regioni frontali e centrali del cervello. Nei soggetti che avevano una maggiore esperienza di meditazione si verificavano altri cambiamenti: le onde alfa diminuivano da una frequenza normale di 9-12 cicli al

SHELLGRIP È SICUREZZA

Malgrado i perfezionamenti tecnici apportati agli autoveicoli, le campagne per l'educazione e la sicurezza stradale ed ogni altro mezzo o provvedimento messo in opera dai vari ambienti interessati, sono piú di 12 000 i morti, oltre 250 000 i feriti ed ingentissimi i danni alle cose provocati mediamente ogni anno negli incidenti stradali dagli automezzi circolanti in Italia, il cui numero ha ormai raggiunto i 15 milioni ed è in continuo aumento.

È noto che, fra i molteplici fattori che influiscono su questo grave problema della sicurezza stradale, una essenziale incidenza è dovuta alle strade stesse, con le loro diverse caratteristiche geometriche, di visibilità, di segnaletica, ecc. e, in particolare, con le condizioni delle loro pavimentazioni.

Qualunque sia infatti la causa principale di un sinistro stradale, è evidente che nella maggioranza dei casi esiste un denominatore comune che ha una larga influenza sulla dinamica dell'incidente — e quindi sulle sue conseguenze — e che è costituito dalla tenuta di strada in genere e dalla distanza di frenatura in particolare, ed è pertanto strettamente connesso con l'aderenza e l'attrito fra le ruote dei veicoli e la superficie della pavimentazione stradale.

Se si considera che le normali pavimentazioni stradali presentano inizialmente un coefficiente di attrito di 0,8 ÷ 0,9 se asciutte (cioè molto prossimo al valore 1 massimo teorico), che scende però a 0,6 ÷ 0,7 se bagnate, decadendo poi in condizioni di traffico intenso, entro due o tre anni ad un livello rispettivamente di 0,4 ÷ 0,5 e 0,3 ÷ 0,4 che è già sinonimo di strada levigata e scivolosa e quindi potenzialmente pericolosa, risulta evidente la generalità dell'influenza del coefficiente d'attrito sulla sicurezza stradale, specialmente in quelle zone (curve, incroci, ecc.) ove la pavimentazione stradale si leviga più rapidamente mentre maggiore sarebbe l'esigenza di antisdrucciolevolezza.

Un altro impressionante elemento di confronto è poi dato dalla variazione della distanza minima di arresto in funzione del coefficiente d'attrito, come può essere rilevato dalla tabella 1.

TABELLA 1		DISTANZE MINIME TEORICHE DI ARRESTO IN METRI					
SUPERFICIE STRADALE	COEFFICIENTE DI ATTRITO	VELOCITA' IN KM/ORA					
		40	60	80	100	120	140
RUVIDA ASCIUTTA	0,90	7	16	28	44	64	86
	0,80	8	18	32	50	72	96
RUVIDA BAGNATA	0,70	9	21	37	57	82	110
	0,60	11	24	43	67	96	129
	0,50	13	29	51	80	115	155
LISCIA BAGNATA	0,40	16	36	64	100	144	192
	0,30	21	48	35	134	193	258
	0,20	32	72	128	200	288	384

Si è quindi presentato sempre piú importante ed urgente il problema di realizzare una superficie stradale con coefficiente di attrito nettamente superiore a quelli forniti dai materiali lapidei naturali, onde assicurare una tenuta di strada decisamente piú sicura e, in condizioni di emergenza, distanze di arresto sensibilmente piú corte.

Questo problema è stato posto allo studio dal Gruppo Shell fino dal 1960, sulla base di un orientamento verso una soluzione rappresentata da un trattamento di irruvidimento superficiale da poter applicare su qualunque pavimentazione stradale.

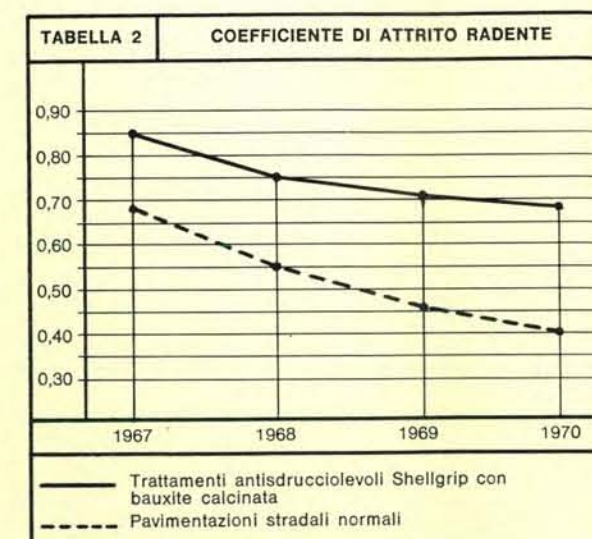
Questo trattamento, che prende il nome (Shellgrip) dal termine « grip » che significa appunto « aderenza », consiste nell'ancorare fermamente alla superficie stradale un sottile strato di graniglia durissima, adoperando un nuovo tipo di legante espressamente studiato per questo scopo.

La graniglia scelta per questo impiego è costituita da uno speciale tipo di bauxite della Guiana, calcinata a 1600 °C e frantumata in pezzatura di dimensioni comprese fra 1 e 3 millimetri, che presenta un coefficiente di attrito ed una resistenza all'usura eccezionalmente alti, molto superiori a quelli raggiungibili con i materiali lapidei naturali. Il nuovo legante messo a punto nei laboratori di ricerca della Shell è un composto epossidico-bituminoso, dotato di elevatissime proprietà di resistenza chimica e meccanica, elasticità, tenacia ed adesione.

L'applicazione del trattamento Shellgrip è costituita semplicemente dalla spruzzatura del legante sulla superficie stradale, che deve però essere sufficientemente pulita e regolare, e dalla immediata copertura con la graniglia di bauxite calcinata; all'indurimento del legante, che avviene entro un periodo variabile da 1 a 3 ore a seconda della temperatura ambiente, il traffico può essere riaperto sulla zona trattata.

Questo tipo di trattamento, che è il risultato di un accurata messa a punto e sperimentazione su strada durata fino al 1966, da tale data è stato impiegato in diversi paesi europei (Inghilterra, Svizzera, Germania Occidentale, Svezia, Olanda, Francia, Austria, ecc.) con risultati veramente incoraggianti agli effetti della sicurezza della circolazione stradale.

In proposito basta citare gli interventi eseguiti a Londra nelle zone di traffico piú intenso e pericoloso, che dal 1967 al 1970 si sono sviluppati su 217 incroci stradali e attraversamenti pedonali, continuando poi ad essere applicati in numero crescente.

In queste applicazioni è stato periodicamente rilevato il coefficiente d'attrito, che ha presentato i valori che sono riportati nel grafico di Tabella 2, ove sono confrontati con quelli misurati nello stesso periodo sulle normali pavimentazioni stradali nelle stesse condizioni di traffico.

Il successo dell'operazione è inoltre sancito dalla diminuzione di oltre il 50 % degli incidenti negli incroci stradali ed oltre il 75 % negli attraversamenti pedonali trattati, nei confronti dei corrispondenti periodi degli anni rispettivamente precedenti, nonché dalla approvazione ufficiale da parte del Ministero dei Trasporti inglese del tipo di trattamento e dei materiali impiegati.

In Italia, dopo l'acquisizione della necessaria esperienza in sede di laboratorio e di prove al vero, il trattamento Shellgrip è stato sperimentato su strada per la prima volta verso la fine del 1968. A seguito dei primi risultati veramente promettenti e del crescente interesse da parte delle Amministrazioni e dei tecnici del ramo, sono state svolte successivamente diverse applicazioni sia di carattere ancora dimostrativo che come veri e propri interventi compiutamente funzionali, nelle zone piú pericolose di traffico a Genova, Milano e Roma, in corrispondenza delle barriere su alcune autostrade, in alcuni incroci e attraversamenti pedonali su strade provinciali e, in condizioni di estreme sollecitazioni, nella curva piú stretta dell'Autodromo di Vallelunga (Roma).

I valori trovati per il coefficiente d'attrito sui trattamenti Shellgrip effettuati in Italia si sono dimostrati in linea con i brillanti risultati inglesi precedentemente riferiti; lo stesso dicasi anche per quanto riguarda la riduzione degli incidenti che, secondo le rilevazioni eseguite dal Corpo dei Vigili Urbani di Milano, si è confermata nella misura del 50 %, mentre analoghe positive indicazioni stanno dando i rilevamenti a cura dei Vigili Urbani di Roma e, in maniera ancora piú efficace, le osservazioni effettuate a Genova.

Per quanto riguarda infine la durata nel tempo della funzionalità di questi trattamenti antisdrucciolevoli, dall'esperienza conseguita all'estero e da questi primi controlli in Italia appare lecito attendersi, anche sotto questo aspetto, risultati di eccezionale livello.

secondo a sette o otto cicli al secondo, e comparivano onde ritmiche teta con una frequenza di 6-7 cicli al secondo. In India, Anand e altri ricercatori trovarono che anche nei praticanti yoga come nei monaci Zen si osservava un aumento della attività alfa durante la meditazione. N. N. Das e H. Gastaut, in esami elettroencefalografici di sette praticanti yoga, osservarono che man mano che la meditazione progrediva le onde alfa cedevano il passo a una attività di onde rapide con una velocità di 40-45 cicli al secondo e queste onde a loro volta diminuivano e c'era un ritorno alle onde alfa e teta.

Un'altra risposta fisiologica analizzata dai primi ricercatori era la resistenza della pelle a una corrente elettrica. Si pensa che questa misura rispecchi il livello di « ansietà »: mentre una diminuzione della resistenza cutanea rappresenta una maggiore ansietà, un aumento, un maggiore rilassamento. Ne risulta che la meditazione aumenta la resistenza nei praticanti yoga e in qualche modo stabilizza tale resistenza nei meditatori Zen.

Abbiamo deciso di intraprendere uno studio sistematico sugli effetti fisiologici, o per meglio dire, sulle correlazioni fisiologiche della meditazione. Nello studio della letteratura, abbiamo trovato una sconcertante variazione nei casi e nei risultati dei diversi studi. I soggetti si differenziavano molto per le tecniche di meditazione, per la loro esperienza e per le loro prestazioni. Questo non è tanto vero per i praticanti Zen, poiché tutti usano la stessa tecnica, ma è caratteristico della pratica yoga che ha molti piú cultori. Lo stato chiamato yoga (che significa « unione ») ha una definizione generalmente accettata: uno stato di coscienza « superiore » raggiunto con il corpo completamente a riposo e rilassato e con la mente sveglia al massimo grado e rilassata. Tuttavia, nel tentativo di raggiungere questo stato, i praticanti indiani usano modi diversi. Alcuni tentano di raggiungere lo scopo attraverso uno strenuo esercizio fisico; altri si concentrano sul controllo di una funzione ben definita, come il ritmo respiratorio; altri si concentrano su processi esclusivamente mentali, basati su alcuni espedienti per la concentrazione e la contemplazione. La differenza delle tecniche può produrre una dicotomia di eventi fisiologici, per esempio, mentre in quelli che si servono della contemplazione si osserva una diminuzione del consumo di ossigeno, in quelli che per raggiungere lo yoga praticano esercizi fisici si osserva un aumento del consumo di ossigeno. Inoltre, poiché la maggior parte delle tecniche richiede una disciplina rigorosa e un lungo addestramento, l'ambito delle capacità è ampio ed è difficile riconoscere chi è un « esperto » e quanto esperto egli possa essere. Tutte queste complicazioni resero ovviamente estremamente difficile il problema di scegliere dei soggetti adatti al nostro studio sistematico.

Fortunatamente c'è una tecnica yoga largamente praticata che è cosí ben standardizzata da permetterci di condurre degli studi su vasta scala in condizioni ragionevolmente uniformi. Questa tecnica, detta « meditazione trascendentale », è stata introdotta da Maharishi Mahesh Yogi e viene insegnata da un'organizzazione di istruttori che egli addestra di persona. La tecnica non richiede una concentrazione intensa o particolari forme di rigoroso controllo fisico e mentale e si impara facilmente cosicché tutti i soggetti che si sono sottoposti a un periodo di allenamento anche relativamente breve sono « esperti ». L'allenamento non implica fede in credenze o modi di vita particolari. Consiste semplicemente in due sedute al giorno di pratica, ciascuna di 15-20 minuti.

Il praticante si siede in posizione comoda con gli occhi chiusi. Mediante un metodo sistematico che gli è stato insegnato egli percepisce un suono o un pensiero « adatto ». Senza tentare di concentrarsi specificatamente su questo, permette alla sua mente di sperimentarlo liberamente e il suo pensiero, come i praticanti stessi riferiscono, si innalza a « un livello piú bello e piú creativo in modo semplice e naturale ». Si ritiene che negli Stati Uniti piú di 90 000 uomini e donne siano stati istruiti nella meditazione trascendentale dall'organizzazione che la insegna. Quindi avevamo a disposizione per i nostri studi un gran numero di soggetti istruiti allo stesso modo.

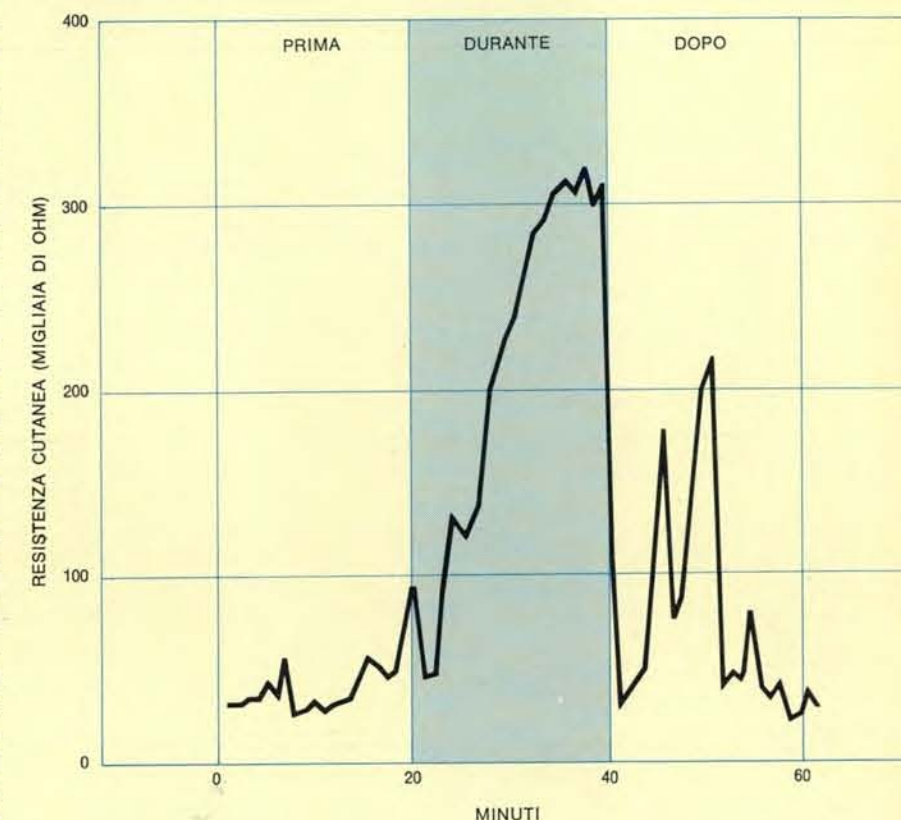
Quanto segue è un rapporto sui dettagliati rilievi fatti su un gruppo di 36 soggetti. Alcuni sono stati osservati al Thorndike Memorial Laboratory, una sezione dell'Harvard Medical Unit del City Hospital di Boston. Gli altri sono stati tenuti sotto osservazione all'Università della California a Irvine. 28 erano maschi e 8 donne; avevano un'età che variava dai 17 ai 41 anni. La loro esperienza nel campo della meditazione variava da meno di un mese a nove anni, ma la maggioranza aveva un'esperienza dai due ai tre anni.

Durante ciascuna prova il soggetto serviva da controllo di se stesso, in quanto passava parte della seduta in meditazione e parte in stato normale non meditativo. Al soggetto venivano applicati congegni per registrare continuamente la pressione sanguigna, il ritmo cardiaco, la temperatura rettale, la resistenza cutanea e gli eventi elettroencefalografici, e durante questo periodo venivano prelevati dei campioni a intervalli di 10 minuti per analizzare il consumo di ossigeno, l'eliminazione dell'anidride carbonica e altri parametri. Il soggetto sedeva su una sedia. Dopo un periodo di adattamento di 30 minuti avevano inizio le analisi e continuavano per tre periodi: 20-30 minuti di stato tranquillo premeditativo, poi 20-30 minuti di meditazione, e infine 20-30 minuti dal momento in cui al soggetto veniva chiesto di sospendere la meditazione.

Le misure del consumo di ossigeno e dell'eliminazione di anidride carbonica confermarono esattamente ciò che era stato riportato in lavori precedenti. Il consumo di ossigeno diminuiva bruscamente da 251 centimetri cubi al minuto nel periodo di pre-meditazione, a 211 centimetri cubi durante la meditazione; nel periodo di post-meditazione aumentava di nuovo gradualmente a 242 centimetri cubi. Analogamente, l'eliminazione di anidride carbonica diminuiva da 219 centimetri cubi al minuto nel periodo precedente l'inizio della meditazione a 187 centimetri cubi nel periodo meditativo per ritornare ai valori normali nel periodo di post-meditazione. Il rapporto tra eliminazione di anidride carbonica e consumo di ossigeno (in volume) rimaneva essenzialmente invariato durante i tre periodi, il che sta a indicare che per entrambi il fattore di controllo era la velocità del metabolismo. La riduzione della velocità del metabolismo (e quindi del fabbisogno di ossigeno) durante la meditazione era rispecchiata da una diminuzione, pressoché involontaria, della velocità di respirazione (due respiri in meno al minuto) e del volume dell'aria respirata (un litro in meno al minuto).

Per misurare la pressione arteriosa e per prelevare dei campioni di sangue abbiamo usato un catetere inserito nell'arteria brachiale nascondendo il braccio alla vista del soggetto con una tenda in modo da non esporlo a possibili traumi psicologici provocati dalla vista del sangue prelevato. Poiché si praticava l'anestesia locale nel punto dove il catetere era inserito, il soggetto non provava alcuna sensazione quando si prelevava il sangue. La pressione sanguigna veniva misurata costantemente per mezzo di un apparecchio connesso al catetere.

Gli effetti della meditazione sul consumo di ossigeno (*in nero*) e sull'eliminazione di anidride carbonica (*in colore*) sono stati registrati su alcuni soggetti rispettivamente in 20 e 15 casi. Dopo che i soggetti erano stati invitati a cominciare la meditazione, entrambe le velocità diminuivano notevolmente (*fascia in colore*). Il consumo e l'eliminazione ritornavano però normali non appena i soggetti interrompevano la meditazione.

È evidente una rapida diminuzione della concentrazione del lattato ematico dopo l'inizio della meditazione (*fascia in colore*). Il lattato è prodotto dal metabolismo anaerobico. La sua concentrazione di norma diminuisce in un soggetto a riposo, ma si è visto che durante la meditazione la diminuzione era tre volte piú veloce del normale.

Un rapido aumento della resistenza elettrica della pelle accompagnava la meditazione (*fascia in colore*) in un soggetto tipo. Nei 15 soggetti esaminati si è osservato un aumento di circa 140 000 ohm in 20 minuti. Durante il sonno la resistenza cutanea di norma aumenta ma non in misura cosí rilevante e solo dopo un tempo molto piú lungo.

Abbiamo trovato che la pressione arteriosa dei soggetti si manteneva a un livello abbastanza basso per tutta la durata dell'esame; scendeva a questo livello durante il periodo di tranquillità precedente la meditazione e non cambiava significativamente durante e dopo il periodo di meditazione. In media la pressione sistolica era uguale a 106 mm di mercurio, la pressione diastolica a 57 e la media a 75. Nel sangue arterioso, le pressioni parziali di anidride carbonica e ossigeno rimanevano essenzialmente invariate durante la meditazione. C'era un lieve aumento dell'acidità del sangue, indicante una leggera acidosi metabolica durante la meditazione, ma l'acidità rientrava nell'ambito normale di variazione.

Le misure della concentrazione di lattato nel sangue (come indice del metabolismo anaerobico, o del metabolismo in assenza di ossigeno libero) mostravano che durante la meditazione il livello del lattato diminuiva precipitosamente nei soggetti. Durante i primi 10 minuti di meditazione il livello del lattato nel sangue arterioso diminuiva a una velocità di 10,26 milligrammi per 100 centimetri cubi all'ora, quasi quattro volte piú rapidamente rispetto alla velocità di diminuzione in persone in normale condizione di riposo supina o nei soggetti stessi nel periodo pre-meditativo. Dopo che i soggetti sospendevano la meditazione il livello del lattato continuava a diminuire per alcuni minuti e poi cominciava a salire, ma alla fine del periodo di post-meditazione esso era ancora considerevolmente inferiore rispetto al livello che aveva nel periodo antecedente la meditazione. Il livello medio durante la pre-meditazione era di 11,4 milligrammi per 100 centimetri cubi, durante la meditazione di 8 milligrammi e durante il periodo successivo alla meditazione di 7,3 milligrammi.

Come si può spiegare il fatto che la produzione di lattato, che è un indice del metabolismo anaerobico, sia cosí fortemente ridotta durante la meditazione? Nuovi esperimenti condotti fornirono una possibile risposta. Questi esperimenti riguardavano la velocità del flusso sanguigno nei soggetti in meditazione; la spiegazione che se ne può trarre è importante se si tiene conto dei benefici psicologici che si possono ottenere con la meditazione.

In studi condotti all'Università di Tubinga, H. Rieckert ha riportato che, durante la meditazione trascendentale, nei suoi soggetti si osservava un aumento del 300 per cento nel flusso sanguigno dell'avambraccio. In misure analoghe fatte sui nostri soggetti abbiamo trovato un aumento del flusso sanguigno dell'avambraccio molto minore: 32 %. Nonostante ciò questo aumento era interessante e offriva una spiegazione alla diminuzione relativamente grande della concentrazione del lattato nel sangue. Il sito principale di produzione di lattato nel corpo è il tessuto del muscolo scheletrico. Probabilmente, l'osservata accelerazione del flusso sanguigno nei muscoli dell'avambraccio, accelera l'apporto di ossigeno ai muscoli. L'aumento del metabolismo ossidativo che ne risulta può sostituire il metabolismo anaerobico e questo spiegherebbe la brusca diminuzione della produzione di lattato che accompagna la meditazione.

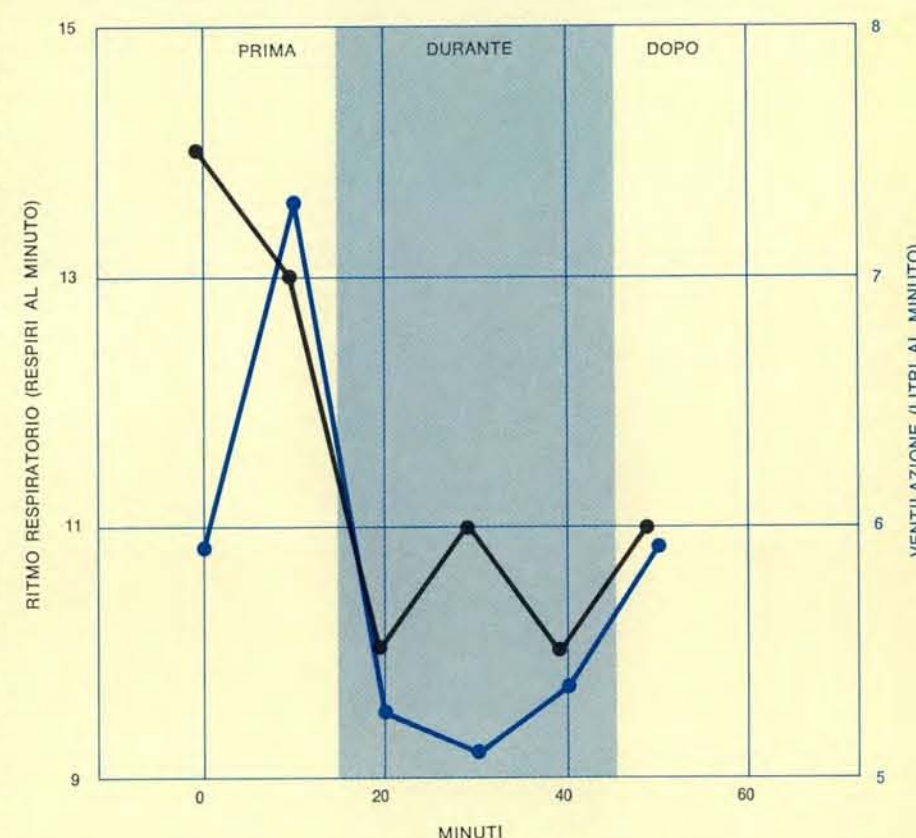
La conseguenza interessante di questa interpretazione è che questa dà il massimo risalto al sistema nervoso autonomo. In una situazione di pressione sanguigna costante (che è quanto si verifica durante la meditazione) la velocità del flusso sanguigno è controllata in primo luogo dalla dilatazione o dalla costrizione dei vasi sanguigni. Il sistema nervoso autonomo controlla a sua volta questo comportamento dei vasi sanguigni. In questo sistema un elemento, una parte della rete nervosa simpatica, a volte dà luogo alla secrezione di acetilcolina attraverso speciali fibre e quindi stimola la dilatazione dei vasi sanguigni. Al contrario, la maggior parte della rete nervosa simpatica stimola la secrezione di norepinefrina causando cosí la costrizione dei vasi sanguigni. I dati di Rieckert riguardanti un forte aumento del flusso sanguigno durante la meditazione suggeriscono che la meditazione aumenta l'attività della rete nervosa simpatica che secerne la sostanza dilatante. I nostri risultati relativi a un aumento molto piú modesto del flusso ematico indicavano una diversa interpretazione: che cioè la meditazione riduce l'attività della maggior parte della rete nervosa simpatica cosicché la costrizione dei vasi a essa dovuta viene a mancare. Anche questa interpretazione permette di spiegare la forte diminuzione della produzione di lattato durante la meditazione; è noto che la norepinefrina stimola la produzione di lattato e quindi è da prevedere che una riduzione della secrezione della norepinefrina, tramite l'inibizione della maggior parte della rete simpatica, diminuisca la produzione di lattato.

Qualunque sia la spiegazione della diminuzione del livello del lattato nel sangue, è chiaro che questa ha un effetto psicologico benefico. Nei pazienti affetti da nevrosi ansiosa si è osservato un forte aumento del lattato nel sangue quando sono sottoposti a stress (si veda l'articolo *La biochimica dell'ansia* di Ferris N. Pitts jr., in « Le Scienze », n. 8, aprile 1969). In effetti, Pitts e J. N. McClure jr., un collaboratore di Pitts alla Facoltà di medicina dell'Università di Washington, hanno dimostrato sperimentalmente che una infusione di lattato potrebbe provocare attacchi di ansia in tali pazienti e potrebbe produrre sintomi di ansia anche in soggetti normali. Inoltre, è significativo il fatto che nei pazienti affetti da ipertensione (essenziale e renale) si osservano livelli di lattato ematico piú alti in stato di riposo rispetto ai pazienti che non sono affetti da ipertensione, mentre invece il basso livello di lattato nei praticanti la meditazione trascendentale è associato a bassa pressione sanguigna. Tutto sommato, è ragionevole ipotizzare che il basso livello di lattato trovato nei soggetti durante e dopo la meditazione trascendentale sia responsabile dello stato di rilassamento dei meditatori.

Altre analisi condotte sui praticanti la meditazione confermavano il quadro di una condizione di profondo rilassamento in piena coscienza. Durante la meditazione la resistenza della cute aumentava notevolmente sotto lo stimolo di una corrente elettrica, in alcuni casi l'aumento era di oltre quattro volte. Il ritmo cardiaco rallentava in media di tre battiti al minuto. Le registrazioni elettroencefalografiche rivelavano una notevole intensificazione delle onde alfa in tutti i soggetti. Le onde sono state registrate su nastro magnetico da sette zone principali del cervello e il loro andamento analizzato con un calcolatore. Di solito c'era un aumento dell'intensità delle onde alfa lente a 8-9 cicli al secondo nelle regioni frontale e centrale del cervello durante la meditazione. In molti soggetti questa variazione è anche accompagnata da onde teta evidenti nella regione frontale.

Per riassumere, i nostri soggetti durante la pratica della meditazione trascendentale manifestavano quei segni fisiologici che noi descriviamo come uno stato « ipometabolico cosciente »: diminuzione del consumo di ossigeno, dell'eliminazione di anidride carbonica e del ritmo e del volume della respirazione; un leggero aumento dell'acidità del sangue arterioso; una notevole diminuzione del livello del lattato ematico; un rallentamento del battito cardiaco; un notevole aumento della resistenza cutanea; e un tracciato elettroencefalografico con intensificazione

Non è stata osservata alcuna variazione significativa nei 9 soggetti ai quali è stata misurata la pressione arteriosa prima, durante e dopo la meditazione. La pressione sistolica (*in alto*), la pressione media (*al centro*) e la pressione diastolica (*in basso*) si mantenevano comunque relativamente basse per tutto il periodo di osservazione del soggetto.

Durante la meditazione si verificavano delle diminuzioni del ritmo respiratorio (*in nero*) e del volume dell'aria respirata (*in colore*). Tuttavia il rapporto tra anidride carbonica espirata e ossigeno consumato si manteneva invariato e entro valori normali.

Dalle letture all'elettroencefalogramma delle regioni frontali del cervello dei soggetti risultava evidente un aumento dell'intensità delle onde alfa « lente », da 8 a 9 cicli per secondo, durante la meditazione (*fascia in colore*). Prima della meditazione, le letture frontali sulla maggior parte dei soggetti, mostravano onde alfa di minore intensità.

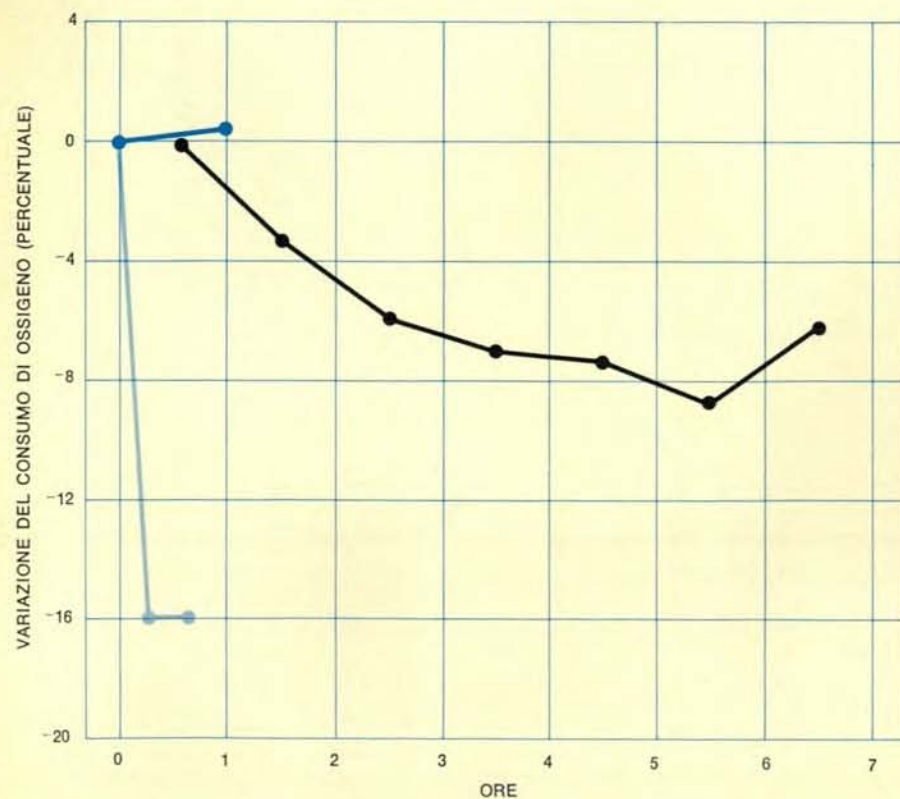
delle onde alfa lente e con attività saltuaria delle onde teta. Queste modificazioni fisiologiche, in persone che praticavano la tecnica della meditazione trascendentale, di facile apprendimento, erano molto simili a quelle che sono state osservate in esperti di yoga molto allenati e nei monaci Zen che hanno un'esperienza nel campo della meditazione di 15-20 anni.

Come si possono confrontare le variazioni fisiologiche che compaiono durante la meditazione con quelle che si osservano in altre condizioni di rilassamento come il sonno e l'ipnosi? C'è poca rassomiglianza. Mentre il consumo di ossigeno diminuisce rapidamente entro i primi cinque o dieci minuti di meditazione trascendentale, l'ipnosi non provoca alcuna variazione di rilievo di questo indice metabolico, e durante il sonno il consumo di ossigeno diminuisce in modo apprezzabile soltanto dopo varie ore. Durante il sonno la concentrazione di anidride carbonica nel sangue aumenta significativamente, il che sta a indicare una riduzione della respirazione. C'è un lieve aumento dell'acidità del sangue; questo è chiaramente dovuto alla diminuzione di ventilazione e non a una variazione del metabolismo come invece accade durante la meditazione. La resistenza cutanea in genere aumenta durante il sonno, ma la velocità e l'entità di questo aumento sono molto minori di quelle che si osservano durante la meditazione trascendentale. I tracciati elettroencefalografici caratteristici del sonno sono differenti; essi consistono in maniera predominante di attività ad alto voltaggio (forte) di onde lente da 12-14 cicli al secondo e di un insieme di onde piú deboli a varie frequenze – un quadro che non si riscontra durante la meditazione trascendentale. I tracciati che si osservano durante l'ipnosi non hanno alcuna relazione con quelli dello stato di meditazione; in un soggetto ipnotizzato l'attività delle onde cerebrali prende la forma caratteristica dello stato mentale che è stato suggerito al soggetto. Lo stesso dicasi per i cambiamenti di ritmo cardiaco, pressione del sangue, resistenza cutanea e respirazione; in una persona ipnotizzata tutti questi parametri rispecchiano lo stato suggerito.

È interessante confrontare gli effetti ottenuti con la meditazione con quelli che si possono stabilire mediante un condizionamento efficace. Mediante tale condizionamento, gli animali e le persone sono state addestrate ad aumentare o diminuire il loro ritmo cardiaco, la pressione del sangue, la formazione di urina, e altre funzioni autonome. Mediante l'uso di ricompense che agiscono da incentivo, al soggetto viene insegnato a dare una risposta interna specifica a un certo stimolo. Questo procedimento e i risultati sono tuttavia completamente differenti da quanto accade nella meditazione trascendentale. Mentre il condizionamento si limita a produrre delle risposte specifiche e dipende da uno stimolo e dal controllo operato da un incentivo, la meditazione è indipendente da questi fattori e non produce una singola risposta specifica, ma un complesso di risposte che contrassegnano uno stato di profondo rilassamento.

Il quadro delle variazioni suggerisce che la meditazione provoca una risposta integrata, o riflesso, che è mediata dal sistema nervoso centrale. Un ben noto riflesso di tale natura è stato descritto molti anni fa dal famoso fisiologo di Harvard, Walter B. Cannon; questo è chiamato « reazione di lotta o fuga » o « allarme difensivo ». Il sistema nervoso simpatico stimolato mette in moto una serie di risposte fisiologiche contrassegnate da aumenti della pressione sanguigna, ritmo cardiaco, flusso del sangue nei muscoli e consumo di ossigeno. Lo stato ipometabolico prodotto dalla meditazione è naturalmente opposto a questo sotto quasi tutti gli aspetti. Esso sembra molto simile all'opposto della reazione di lotta o fuga.

Durante la preistoria dell'uomo è probabile che la reazione di allarme difensivo abbia avuto un enorme valore per la sopravvivenza e quindi che si sia radicata nel suo corredo genetico. Questa reazione continua a essere evocata in tutti i suoi aspetti interiori quando l'individuo si sente minacciato. Eppure nell'ambiente del nostro tempo la reazione è spesso anacronistica. Sebbene la reazione di allarme difensivo non sia in genere piú appropriata, la risposta interiore viene evocata con notevole frequenza dai rapidi e sconvolgenti mutamenti che minacciano la moderna società. Ci sono buone ragioni per credere che i continui stimoli dell'ambiente che cambia sul sistema nervoso simpatico siano ampiamente responsabili dell'elevata incidenza dell'ipertensione e di altre gravi malattie simili che sono frequenti nella nostra società.

In questa circostanza lo stato ipometabolico, che rappresenta lo stato di riposo, piuttosto che la iperattivazione del sistema nervoso simpatico, può dare indicazioni per migliorare lo stato di salute. Sarebbe molto utile ricercare le possibilità di applicazione clinica di questo stato di riposo e rilassamento cosciente.

Confronto del consumo di ossigeno in tre diverse circostanze: durante l'ipnosi (*in colore*), il sonno (*in nero*) e la meditazione (*in colore chiaro*). Non ci sono variazioni notevoli durante l'ipnosi. Il consumo di ossigeno si riduce di circa l'8 % dopo 5 ore di sonno. La meditazione produce una riduzione doppia in una frazione di tale tempo.

Il controllo dell'incremento demografico dal 1750 al 1850

In questo periodo la popolazione dell'Europa giunse quasi a raddoppiarsi, ma ancor piú sarebbe cresciuta se non fosse stata sottoposta a certi controlli, che per la maggior parte si identificano con il celibato e l'infanticidio

di William L. Langer

Nell'intervallo di soli cent'anni, tra la metà del settecento e la metà dell'ottocento, la popolazione dell'Europa pervenne quasi a raddoppiarsi. Quali sono le ragioni di questo fenomeno? A metà circa di questo periodo Thomas Malthus dichiarò nel suo famoso saggio che la fecondità umana è cosí grande che se la popolazione crescesse liberamente, senza essere sottoposta a controlli, il suo incremento sarebbe molto piú rapido di quello dei mezzi di sussistenza. Malthus però non suppose mai, neppure per un momento, che la popolazione potesse crescere senza controlli. In tutti i tempi e in tutti i luoghi il suo incremento era stato soggetto a restrizioni cosicché, se la grandezza delle popolazioni umane tendeva costantemente a comprimere i mezzi di sussistenza, e una parte molto estesa della popolazione era perciò condannata a vivere in miseria al limite della morte per inedia, il disastro definitivo veniva sempre prevenuto.

I controlli primari dell'incremento demografico noti a Malthus e a vari suoi predecessori nel campo della teoria della popolazione erano gli antichi flagelli della guerra, della fame e delle malattie. Nei giorni in cui gli eserciti traevano i mezzi di sussistenza dalle campagne, agli abitanti restava ben poco da mangiare. Inoltre i sudici accampamenti militari erano un terreno favorevole allo sviluppo di malattie, con la conseguenza che gli eserciti lasciavano normalmente dietro di sé una scia di epidemie. Ovviamente la guerra non era l'unica causa della fame e delle malattie; molto frequenti erano anche i cattivi raccolti. E benché si trattasse di fenomeni puramente locali, in un'epoca in cui i trasporti erano difficili, la prospettiva della fame era tutt'altro che impossibile. Le popolazioni locali si riducevano spesso a mangiar radici, scorze e anche erba.

Le malattie tendevano a diffondersi lungo gli itinerari commerciali, sviluppandosi in primo luogo nelle città, in cui vigevano condizioni di vita malsane. Le pestilenze tornavano a intervalli di una decina d'anni, e le epidemie peggiori si portavano via spesso da un quarto a un terzo della popolazione. Ancora nel 1720 la peste, scoppiata nella Francia sud-orientale, fece 40 000 vittime su un totale di 90 000 abitanti a Marsiglia, e i cadaveri venivano ammucchiati nelle strade per mancanza di uomini che li trasportassero via.

Oltre alla peste c'erano altre malattie mortali. Per esempio, solo quattro persone circa su 100 riuscivano a sfuggire al vaiolo, una malattia spaventosa che colpiva soprattutto i bambini nei primi due anni di vita. Il vaiolo era fatale in un caso su sette circa; negli ultimi decenni del settecento fu responsabile del 10 per cento di tutti i decessi. In una versione ampliata del *Saggio sul principio della popolazione*, edita nel 1806, Malthus osservava: « Il vaiolo è certamente uno degli sbocchi, e tra i piú grandi, che la natura ha aperto negli ultimi mille anni per mantenere la popolazione al livello dei mezzi di sussistenza ».

La peste e il vaiolo erano senza dubbio i mezzi piú efficaci nel controllo della popolazione esercitato dalla natura, benché anche la tubercolosi e il tifo non restassero molto indietro. Considerando globalmente il periodo premalthusiano, risulta chiaro che l'umanità viveva costantemente nel terrore della guerra, della fame e delle malattie e che questo terribile trio assicurava un controllo continuo e decisivo sull'incremento demografico. Come Malthus osservò, la pestilenza poteva spazzar via decine di migliaia di uomini. Poi « segue una gigantesca carestia, che con un solo potente colpo livella la popolazione col cibo del mondo ».

Malthus riconobbe che oltre ai tre principali livellatori di cui si è detto c'erano altri « attivi e abili incaricati dello spopolamento », tra i quali dovevano annoverarsi irregolarità sessuali come la casualità dei rapporti, la violazione del significato del matrimonio e modi sconvenienti di nascondere le conseguenze di relazioni illecite. Egli non tentò tuttavia di descrivere o analizzare l'influenza svolta da queste influenze secondarie, né si proposero questo compito i molti autori che, nella scia del *Saggio*, parteciparono alla controversia sollevata da Malthus. In quest'articolo mi propongo di esaminare un po' dettagliatamente alcuni dei controlli supplementari dell'incremento demografico e di tentare una stima della loro importanza.

È probabile che le consuetudini matrimoniali, e in particolare la diffusione del celibato, abbiano esercitato un importante controllo sussidiario sullo sviluppo demografico, anche se non è facile dimostrarlo. La situazione era chiaramente determinata da molte variabili, e le nostre conoscenze sulla diffusione dell'istituto matrimoniale in Europa nel periodo prestatistico sono scarse e inattendibili. L'unica cosa certa è che ovunque esisteva una corrispondenza costante tra numero di matrimoni e condizioni economiche. Un buon raccolto produceva invariabilmente una ricca messe di matrimoni, e gli anni di carestia erano contrassegnati da un netto calo nelle nuove unioni.

Si può dire anche che in generale gli europei del settecento si sposavano piú tardi che non nei secoli precedenti. Per esempio, David J. Herlihy dell'Università del Wisconsin ha stabilito che, verso la fine del quattrocento a Firenze, piú del 90 per cento delle 400 donne circa della classe superiore di cui egli ha esaminato i documenti di matrimonio, si sposò prima dei 20 anni; il 50 per cento di esse si sposarono prima dei 16 anni. Piú scarsi sono i dati esatti per il settecento, ma probabilmente non si dice una cosa lontana dal vero asserendo che a quest'epoca gli uomini si sposavano a un'età media di 28 o 29 anni. Le donne si sposavano a 25 o 26 anni, e gran parte della popolazione non si sposava mai. Poiché le donne prendevano marito cosí tardi, il loro periodo di fecondità veniva ridotto di quasi un terzo, cosicché questa consuetudine finí per avere un effetto importante sull'incremento demografico.

È inoltre opportuno tener bene a mente che fino all'ottocento inoltrato i matrimoni per amore erano in Europa l'eccezione e non la regola. Dovunque fossero in gioco proprietà, il contratto di matrimonio era un accordo d'affari concluso tra i capi delle due famiglie, i quali spesso non tenevano affatto conto dei desideri dei futuri coniugi. Inoltre, molti uomini delle classi superiori erano del tutto contrari al matrimonio, e ciò si doveva, secondo Malthus, alla « facilità con cui potevano indulgere in rapporti illeciti ».

Anche dove non vigeva la legge della primogenitura, la nobiltà faceva ogni sforzo per mantenere integre le proprie sostanze, assicurandosi che fosse sempre un solo individuo a ereditarle. Il grosso delle proprietà toccava di solito al figlio primogenito, il quale provvedeva alla madre e, se possibile, alle sorelle. I suoi fratelli, se egli era disposto a provvedere alla loro istruzione, accedevano alle varie professioni; altrimenti abbracciavano la carriera ecclesiastica o militare; in questo caso restavano celibi, a meno che non fossero abbastanza abili da corteggiare e sposare una ricca ereditiera: questo tema è stato sfruttato a sazietà dalla letteratura del tempo.

Le classi superiori ridussero le possibilità di matrimonio anche al di fuori del proprio ambito. A quest'epoca una delle principali possibilità d'impiego per le donne era quella di andare a servizio; ancora nell'ottocento persone di mezzi piuttosto modesti avevano al loro servizio due o piú domestici e la servitú di un grande castello della nobiltà poteva annoverare da cinquanta a sessanta persone. Di solito ben trattate e ben pagate, le domestiche non avevano alcun desiderio di maritarsi, cosicché molte migliaia di donne venivano sottratte alle schiere delle gravide. Inoltre nelle grandi proprietà, soprattutto nel continente, si richiedeva per il matrimonio il consenso del padrone. Un proprietario terriero poteva inoltre controllare la popolazione nei suoi possedimenti rifiutando la costruzione di casette per i nuovi sposi o addirittura distruggendo le abitazioni esistenti dei fittavoli e costringendo cosí la gente a cercar rifugio altrove. Uno storico eminente ha scritto che nelle Isole britanniche, alla fine del settecento, « c'era dappertutto, in campagna, una guerra aperta per le abitazioni rurali ». Un parroco scozzese, John McFarlan, denunciò con amarezza « la barbara condotta di alcuni gentiluomini di campagna, i quali non sopportano che i poveri si sposino per tema che mettano al mondo una razza di accattoni che dovranno essere mantenuti dal distretto ». Questa pratica, osservava sir Frederick Eden in *The state of the poor*, era « la maggiore difficoltà contro cui il povero doveva lottare ».

Pare che nell'Europa continentale il celibato fosse ancor piú comune che in Inghilterra. I documenti in proposito, benché molto rari, suggeriscono che tra le donne in età feconda, in Francia, dal 30 al 40 per cento restassero nubili e che solo il 40 per cento degli uomini mettesse su famiglia. Molti uomini celibi trovarono rifugio nell'esercito o tra il clero; le zitelle potevano svolgere il ruolo della zia in casa di un fratello oppure andare a servizio. Molti autori del tempo si occuparono del futuro della Francia; un eminente autore moderno parla di una *crise de nuptialité* settecentesca.

Come in Inghilterra, anche nel continente la nobiltà controllava i matrimoni dei servi e di altri lavoratori che vivevano nei propri possedimenti. La situazione vigente nei ducati baltici del Meclemburgo ci fornisce un esempio classico. Molte tra le giovani piú intelligenti e attraenti venivano prese a servizio come domestiche nubili nei castelli signorili. I giovani erano generalmente arruolati nell'esercito all'età di 22 anni e costretti a restare celibi per sei anni, ossia per l'intera durata del servizio. Inoltre l'incremento demografico negli strati piú poveri della popolazione veniva tenuto sotto controllo mediante un'intenzionale carenza di abitazioni.

Le corporazioni delle arti e dei mestieri, là dove conservavano ancora il loro potere, usavano la loro influenza e la loro autorità per impedire o ritardare il matrimonio dei lavoratori. Anche agli operai qualificati che avevano completato il loro lungo tirocinio il capo della corporazione dava raramente il permesso di sposarsi, a meno che la futura sposa non fosse la vedova di un mastro o una figlia che altrimenti non si sarebbe mai sposata. Moltissimi operai qualificati finivano perciò con non sposarsi mai o in avanzata età.

Un altro fattore che contribuiva a ridurre il tasso di natalità era la pratica della milizia mercenaria, cosí popolare a quell'epoca. Per secoli i cantoni svizzeri avevano fatto grossi affari facendo arruolare i loro giovani negli eserciti della Francia, della Spagna, dei Paesi Bassi e di vari stati italiani. Ben pochi di questi uomini tornavano in patria e si sposavano: la mortalità in guerra era molto alta. Secondo alcune stime questa pratica avrebbe ridotto del 35-40 per cento il tasso dell'incremento naturale della popolazione svizzera. Nel 1748 c'erano ancora 20 000 mercenari svizzeri nell'esercito francese, e altrettanti in quello dei Paesi Bassi. Si ritiene che nel corso del settecento i cantoni svizzeri, che contavano una popolazione totale di un milione e mezzo circa, abbiano perduto su campi di battaglia stranieri 500 000 uomini.

Un altro importante controllo dell'incremento demografico si deve vedere nelle registrazioni legali imposte al matrimonio da numerosi stati europei, e particolarmente dai principati tedeschi. Nel settecento tutti i governi desideravano una popolazione quanto piú grande possibile perché si riteneva che la potenza di uno stato dipendesse in gran parte dalle sue risorse umane. Le risorse umane a cui essi pensavano erano però agricoltori forti e laboriosi e abili artigiani. Non desiderando di doversi occupare dei poveri, i governi erano continuamente alla ricerca di stratagemmi per sbarazzarsi degli indigenti o almeno per impedir loro di moltiplicarsi. Gli stati sovrappopolati della Germania presero l'iniziativa di limitare legalmente o addirittura di impedire il matrimonio tra poveri. Le leggi piú radicali furono quelle del Württemberg, una regione in cui la pressione demografica era un male cronico. Una serie di decreti, a partire dal 1712, resero necessaria l'approvazione ufficiale per ogni matrimonio. Ogni aspirante marito doveva dar prova della sua capacità di mantenere una famiglia. Le condizioni poste negavano praticamente ai poveri il diritto al matrimonio.

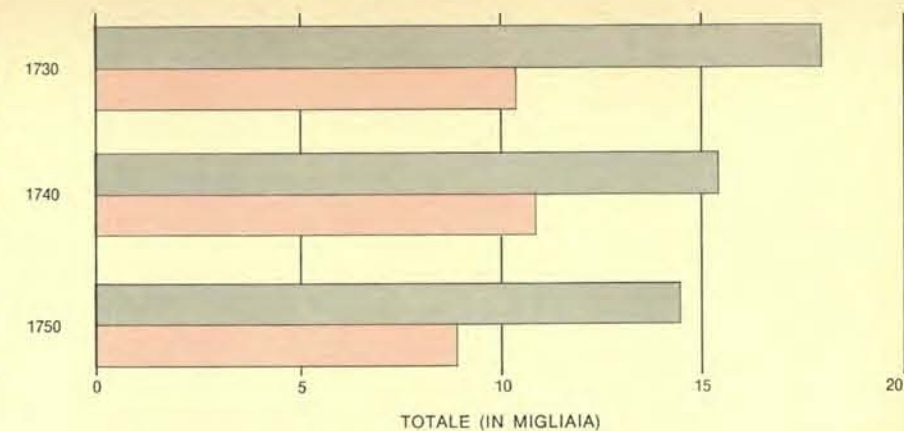
La maggior parte di queste restrizioni furono abbandonate nel fermento del periodo napoleonico, ma vennero reintrodotte e rafforzate all'inizio dell'ottocento, quando l'Europa fu colta dal terrore della sovrappopolazione e fu messa in allarme dalla crescente armata dei poveri. Numerosi cantoni svizzeri e tutti gli stati tedeschi eccettuate la Prussia e la Sassonia adottarono disposizioni tendenti al controllo del matrimonio. Queste disposizioni presentavano un vario grado di rigore;

Il protettore dei trovatelli, Thomas Coram, riuscí a procurarsi l'appoggio del re per la fondazione di un ospizio per bambini abbandonati che aprí le sue porte nel 1741. Egli è qui ritratto mentre si accinge a raccogliere uno dei tanti neonati abbandonati.

quasi senza eccezione richiedevano al futuro marito di dimostrare che non aveva ricevuto sussidi di povertà negli ultimi tre anni, che aveva imparato un mestiere, che aveva un lavoro e un domicilio e che era una persona di buon carattere. L'applicazione di queste ordinanze veniva demandata interamente alle autorità locali, le quali non dimostravano nessuna indulgenza per i poveri.

Nel Württemberg, dove nel 1830 c'era stato un matrimonio ogni 121 abitanti, la proporzione calò nel 1854 a un matrimonio ogni 236 abitanti. Autorevoli economisti tedeschi difendevano tuttavia una tale legislazione restrittiva, sostenendo che nessuno aveva il diritto di mettere al mondo bambini che non fosse poi in grado di mantenere e che perciò sarebbero andati a carico del resto della popolazione.

In Inghilterra una posizione analoga fu assunta da Malthus, dal presidente della Poor Law Commission, la commissione incaricata di elaborare una legislazione relativa al problema dei poveri, Nassau W. Senior, e dallo stesso John Stuart Mill. Senior ordinò in effetti un'indagine sulle restrizioni al matrimonio imposte in altri stati, nell'evidente intenzione di introdurre misure simili anche in Inghilterra. I fermenti sociali erano però cosí grandi, e l'agitazione promossa da William Cobbett e da altri contro la considerazione del matrimonio alla stregua di un lusso fu cosí violenta, che solo un accenno a una tale politica si insinuò nella nuova legge sui poveri del 1834: i poveri dei due sessi accettati negli ospizi dovevano essere tenuti rigorosamente separati, anche quand'erano marito e moglie, per prevenire la propagazione di altri poveri.

Fosse temporaneo o permanente, volontario o forzato, il celibato fu chiaramente un fattore limitante l'incremento demografico in un periodo in cui ancora non esistevano pratiche anticoncezionali. Altrettanto importanti, se non piú, furono i metodi usati per sbarazzarsi dei figli indesiderati. Platone e Aristotele, come del resto altri autori antichi, accettavano l'aborto e difesero l'infanticidio come mezzi necessari per liberare la società da bambini deformi o malati e come mezzo per regolare la grandezza di una popolazione. È anche ben noto che l'esposizione di neonati fu praticata da molte società, anche in tempi recenti. Ciò di cui invece non ci si rende in genere ben conto è la misura in cui l'infanticidio continuò a essere praticato nella civiltà occidentale. In Inghilterra, ancora nel 1878, il 6 per cento circa di tutti i decessi violenti potrebbero essere classificati infanticidi.

Il tasso di mortalità era molto alto fra i trovatelli allevati negli ospizi distrettuali inglesi definiti « case di macello di neonati ». Dei circa 500 000 bambini battezzati tra il 1728 e il 1757, piú del 60 per cento morirono entro il secondo anno d'età. Il diagramma rappresenta i battesimi (*in grigio*) e i decessi (*in colore*) negli anni 1730, 1740 e 1750.

A quest'argomento non si diede molta pubblicità perché le Chiese cristiane lo consideravano con orrore, lo denunciavano insieme all'aborto, ai mezzi anticoncezionali e ad altre pratiche sessuali, e inducevano i governi occidentali a dichiarare l'aborto e l'infanticidio forme di omicidio punibili con la morte, in una varietà di modi che ben illustrano l'immaginazione macabra dei legislatori. Nondimeno, soprattutto fra i poveri, spesso i bambini non erano ben accetti e in ogni caso erano facilmente sostituibili qualora se ne sentisse il desiderio. Non sapremo mai a quante donne siano stati somministrati intrugli pericolosi per provocarne l'aborto o quanti bambini siano stati uccisi nei primi giorni di vita. Questi crimini erano tanto facili da commettersi quanto difficili da provarsi. Poiché i colpevoli venivano scoperti solo raramente, anche le pene piú severe – come la morte per annegamento o il seppellimento del colpevole vivo – avevano uno scarso effetto di dissuasione.

Tra i metodi piú semplici per commettere un infanticidio era la somministrazione di gin o di sonniferi; spesso si ricorreva anche alla morte per fame e allo strangolamento, né erano sconosciuti casi di frattura del cranio con una spazzola per capelli. Un metodo semplice e popolare consisteva nel soffocare col peso del proprio corpo il neonato che dormiva nello stesso letto dei genitori. Senza dubbio quando i genitori erano ubriachi o trascurati ciò poteva accadere in modo non intenzionale, ma quest'incidente era cosí comune che in alcuni paesi si proibí ai genitori di far dormire bambini piccoli nel proprio letto. Di tutti i procedimenti quello meno reprensibile era l'abbandono del neonato all'ingresso di una chiesa o davanti a una porta isolata, nella speranza che qualcuno gli recasse aiuto. La maggior parte di questi bambini abbandonati morivano rapidamente di freddo o di fame.

Nel settecento si potevano vedere abbastanza spesso cadaveri di neonati per le strade o nei letamai di Londra e di altre grandi città. Thomas Coram fu soltanto uno tra i sempre piú numerosi umanitaristi che sentirono lo scandalo e il disgusto di questa situazione. Capitano di mare a riposo, Coram spese 17 anni della sua vita per procurarsi l'appoggio di influenti nobildonne, le quali infine aderirono a una sua petizione al re per la fondazione di un ospizio per l'infanzia, « al fine di evitare il frequente assassinio di poveri, infelici bambini alla loro nascita, e per sopprimere il costume disumano di esporre i neonati a morire nelle strade ».

Quando il brefotrofio di Londra fondato da Coram fu finalmente aperto nel 1741, fu subito evidente che egli aveva sottovalutato la portata del fenomeno. La pressione dei postulanti fu cosí grande che non era raro che donne lottassero davanti alle porte dell'istituto. Infine, nel 1756, il parlamento si impegnò a finanziare il brefotrofio, con l'intesa che venissero accettati tutti i bambini che vi fossero pervenuti. Una cesta munita di una campanella doveva essere appesa all'esterno della porta, in modo che un bambino potesse essere abbandonato senza che la madre fosse vista, ma solo interrogata.

Questa politica delle libere ammissioni sommerse completamente il brefotrofio; nei primi quattro anni furono accettati quasi 15 000 bambini. Fu

impossibile trovare un numero di balie sufficiente e migliaia di bambini morirono nella prima infanzia; solo 4400 dei trovatelli accolti giunsero all'adolescenza. Quest'attività assistenziale costò al parlamento 500 000 sterline e nel 1760 questa politica fu abbandonata. Da questa data in avanti vennero accolti al brefotrofio solo bambini londinesi, e anche questi in numero limitato. In campagna i trovatelli furono assegnati di nuovo agli ospizi distrettuali, che Jonas Hanway, uno degli amministratori del brefotrofio, definí « case di macello dei neonati » perché la mortalità vi era quasi totale. Per risparmiare fatiche e denaro i funzionari distrettuali assegnavano i bambini a balie pagate, le quali erano universalmente detestate e bollate col nomignolo di « balie della morte » o « macellaie » perché nessun bambino riuscí mai a sottrarsi vivo alle loro cure.

In una forma o nell'altra l'infanticidio aumentò continuamente in Europa durante l'ottocento. L'affermazione di Richard Carlile, uno dei primi sostenitori del controllo delle nascite, secondo cui « è dubbio che l'infanticidio sia mai stato praticato in altri paesi piú che nel nostro », rimase incontestata. Essendo i colpevoli raramente scoperti, solo pochi casi furono portati davanti a un tribunale. Gli imputati venivano di solito condannati a pene miti; di fatto uno dei coroner di Londra, ossia uno dei funzionari della Corona incaricati di svolgere indagini nei casi di morti sospette, Edwin Lankester, dichiarò di non aver mai sentito di una donna punita per aver ucciso un suo bambino, per quanto flagranti potessero essere le circostanze. La simpatia del pubblico era decisamente dalla parte delle donne disperate, per lo piú ragazze andate a servizio e messe nei guai dai datori di lavoro, o lavoratrici in miseria costrette dalle circostanze a far ricorso a una prostituzione non ufficiale; abbandonate dai responsabili del loro stato, dovevano occuparsi come potevano dei figli indesiderati. « Purtroppo è vero », scrisse nel 1862 il medico William B. Ryan, « che l'infanticidio non è considerato dal pubblico nella stessa luce degli altri omicidi... Non c'è crimine che riscuota tanta simpatia, e spesso cosí mal riposta ».

Nella biblioteca della Harvard Law School si trova un grosso volume fatto di ritagli di giornali, la maggior parte dei quali sono tratti dalla stampa quotidiana di Londra degli anni 1861-1863. Insieme con l'ampia relazione del comitato per la protezione dell'infanzia del 1781, questi ritagli di stampa ci danno una testimonianza spaventosa della frequenza dell'infanticidio a quest'epoca. Decine e decine di note di cronaca ci dicono di cadaveri di neonati rinvenuti in fiumi, in canali o in fognature, o scoperti sotto cespugli in parchi pubblici o nei campi. Dalle relazioni dei coroner apprendiamo che tra il 1855 e il 1860 furono svolte indagini su 3900 bambini morti nel territorio di Londra, la maggior parte dei quali erano neonati. In 1120 casi si stabilí che si trattava di omicidio; in altri 904 di soffocazione « accidentale ». Dall'inizio del 1861 al giugno 1862 furono compiute indagini su 5113 bambini morti in tutta l'Inghilterra e nel Galles. In 902 casi risultò trattarsi di omicidio; 297 di questi riguardavano Londra. Nel 1862 uno dei coroner per il Middlesex asserí che l'infanticidio era diventato una cosa cosí normale che quando la polizia trovava un bambino morto sembrava non preoccuparsene piú che se avesse trovato morto un cane o un gatto. «Il Morning Star» del 23 giugno 1863 dichiarava che l'infanticidio « sta diventando di fatto un'istituzione nazionale »; e il « Morning Post » del 2 settembre 1863 lo definiva « il crimine piú comune ».

È probabile che la maggioranza degli infanticidi venissero perpetrati dalle bambinaie. Benché l'espressione *baby farming* sia difficilmente anteriore all'opera di Gilbert e Sullivan *H.M.S. Pinafore*, l'istituzione esisteva senza dubbio già da lungo tempo. Nelle città industriali molte donne che lavoravano

1784
1798
1809
1815
1819
1821
1830
1835

0 25 50 75 100 125 150 175
TOTALE (IN MIGLIAIA)

Il diagramma dei bambini abbandonati in Francia nel corso di mezzo secolo mostra un aumento del quadruplo tra il 1784 e il 1835. L'aumento nei decenni successivi al 1811 può essere attribuito alla liberalità del decreto napoleonico di quell'anno.

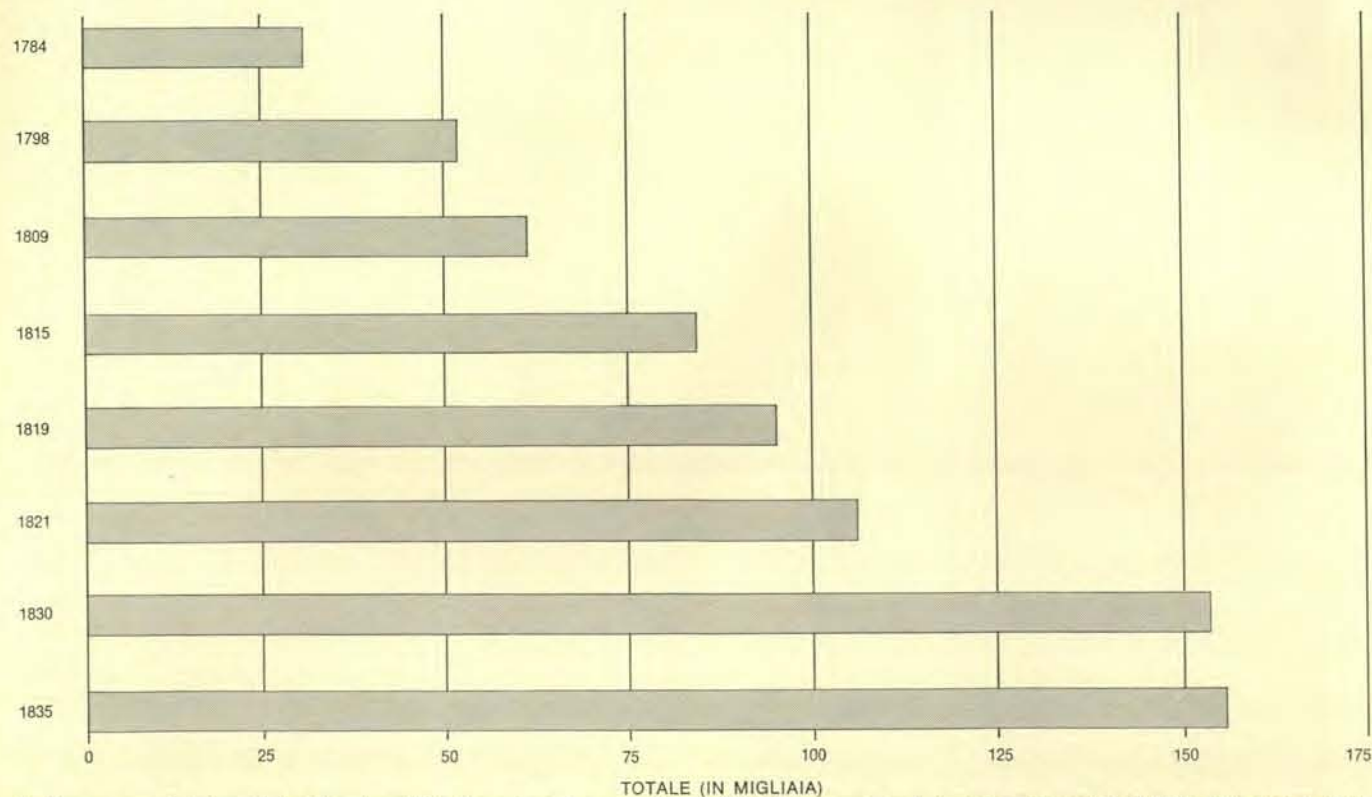
fuori casa e non potevano occuparsi dei figli, li affidavano a bambinaie retribuite, le quali di solito si prendevano cura dei bambini loro affidati facendoli dormire con sonniferi. Molti di quei bambini non si risvegliavano piú. Il sonnifero prediletto era il cordiale di Godfrey, un intruglio composto da oppio, melassa e sassafrasso. A Coventry era venduto al ritmo di 10 galloni la settimana: una quantità sufficiente per 12 000 dosi. Nel 1870 due bambinaie vennero portate davanti a un tribunale dopo che 16 dei bambini loro affidati erano stati trovati morti. Nello stesso anno nella sola Londra furono rinvenuti qua e là i corpi di 276 neonati. In seguito alle pressioni di un gruppo di recente fondazione, la Infant Life Protection Society, nel 1872 il parlamento approvò infine un atto che imponeva alle bambinaie una licenza speciale e una registrazione completa dei bambini loro affidati e degli eventuali decessi.

Nell'Europa continentale l'infanticidio era una pratica diffusa quanto in Inghilterra. In Francia e in altri paesi cattolici si fecero grandi sforzi per risolvere il problema. Quasi un secolo prima che fosse aperto il brefotrofio di Londra, Vincenzo de' Paoli, il grande promotore e organizzatore degli enti assistenziali e delle missioni, aveva interessato le gentildonne della corte parigina alla situazione delle ragazze madri e ai problemi connessi dell'esposizione dei neonati e dell'infanticidio. Egli riuscí a fondare l'Hôpital des enfants trouvés, e col tempo gli assicurò l'aiuto finanziario del governo, che vide nella cura e nell'educazione dei bambini abbandonati una possibile fonte di uomini per l'esercito e per la marina.

Prima della fine del settecento istituzioni analoghe erano state create in tutte le grandi città del continente. A Pietroburgo la grande Caterina istituí nel 1770 uno dei piú grandi e generosi centri per trovatelli ed esortò le dame della corte a rivolgere particolarmente a esso la loro beneficenza. In tutti questi ospizi, cosí com'era avvenuto al brefotrofio di Londra, il numero dei bambini che venivano abbandonati dai genitori crebbe sempre piú finché verso la fine del settecento (periodo che potrebbe essere opportunamente chiamato l'età d'oro della seduzione) tali istituti si rivelarono definitivamente incapaci a far fronte a tutte le richieste. Si dice che qualcosa come 500 *sages femmes* furono noleggiate come bambinaie nella sola Parigi, ma anche cosí i neonati continuavano a essere abbandonati nei vicoli e davanti alle porte delle case con grande noncuranza.

Il trasporto di neonati dalle province a Parigi divenne un'attività lucrosa; la pratica si mantenne per molto tempo nonostante i numerosi decreti che la proibivano, comminando pene molto gravi. A Valenciennes, per esempio, furono organizzate società per il ritiro dei neonati direttamente dalle levatrici e il loro trasporto su carro a Parigi. Il viaggio durava vari giorni, durante i quali i neonati non ricevevano alcuna cura; perciò solo quelli dotati di qualità di resistenza eccezionali sopravvivevano abbastanza da arrivare a destinazione. Ancora poco oltre la metà dell'ottocento la polizia di Rouen riferí il caso di una donna che, tra il 1843 e il 1860, aveva trasportato a Parigi un totale di 192 bambini, collocati in una cesta divisa in scomparti in modo da poterne contenere quattro o cinque per volta. Negli ultimi anni, stando al passo con i progressi tecnologici, essa viaggiò in ferrovia; ciò le consentiva non solo di abbreviare la durata del viaggio, ma anche di raggiungere l'ospizio di Parigi a mezzanotte circa, un'ora favorevole per abbandonare il suo bagaglio senza esser vista.

La letteratura sugli ospizi per trovatelli di Parigi e di altre città è abbondante e dotta, ma oggi quasi del tutto dimenticata. Essa rivela un nettissimo aumento dei trovatelli tra la fine del settecento e l'inizio dell'ottocento. In Francia ci fu complessivamente un incremento di piú del 300 per cento in meno di 40 anni: da un totale di 40 000 *enfants trouvés* nel 1784 si passa a 138 000 nel 1822. A Parigi, tra il 1736 e il 1750, furono accolti negli ospizi circa 4000 bambini all'anno; nel 1765 la cifra fu di 5000, e nel 1780 era compresa tra 6000 e 7000.

Napoleone, al culmine della sua potenza, decise di fare un altro sforzo per impedire l'esposizione e l'uccisione di bambini indesiderati, rendendo il loro abbandono non solo semplice, ma del tutto anonimo. Il 19 gennaio 1811 egli decretò la creazione di ospizi in tutti i dipartimenti della Francia e se possibile in ogni circondario. Ogni ospizio do-

L'esponente della Chiesa che nel seicento dimostrò una maggiore sensibilità per il problema dei trovatelli fu Vincenzo de' Paoli, piú tardi canonizzato; egli è qui raffigurato in un quadro del pittore ottocentesco Nicholas Monsiau che lo presenta nell'atto di raccogliere bambini abbandonati nelle vie di Parigi. Con l'aiuto delle nobildonne della corte, egli aprí uno dei primi ospizi per trovatelli, l'Hôpital des enfants trouvés.

I mali dell'esposizione dei neonati (*a sinistra*) e i benefici della cura dei trovatelli (*a destra*) in un disegno presentato da Hogarth a Coram; esso fu stampato sotto forma di incisione in testa al documento di sottoscrizione per il brefotrofio di Coram. Nel disegno sono visibili tre vittime dell'esposizione: un neonato nudo presso un cespuglio (*in primo piano a sinistra*), un bambino fasciato che viene deposto dalla madre (*sullo sfondo*), e un altro bambino, la cui madre afflitta si inginocchia in lacrime, già in braccio a un funzionario del brefotrofio. A destra una scena di operosità: i trovatelli hanno ricevuto un'educazione; le ragazze vengono impegnate in lavori domestici; i gruppi di lavoro dei ragazzi sono equipaggiati per diversi lavori.

veva avere un ingresso con uno scomparto girevole e una campanella, in modo che chi abbandonava il bambino non potesse essere visto da chi stava all'interno.

Il sistema era cosí allettante che indusse molti genitori ad abbandonare i loro figli legittimi. Si ritiene che tra un quarto e un terzo dei bambini affidati a tali ospizi fossero figli di genitori che non potevano o non volevano allevarli. Nel 1830 esistevano negli ospizi francesi circa 270 ingressi con scomparti girevoli, che non rimasero inoperosi. In un solo decennio (1824-1833) furono affidati agli ospizi 336 297 neonati e le autorità locali faticavano a far fronte alle spese.

È superfluo dire che la mortalità tra i neonati era molto alta. Molti di essi erano già malconci quando arrivavano; gli altri venivano ammassati in locali mal aerati e nutriti alla meglio con le magre risorse di cui gli ospizi disponevano. Era impossibile trovare un numero di balie sufficienti, cosicché la grande maggioranza dei neonati dovevano essere spediti a balia in provincia. Nel corso del viaggio, spesso su lunghe distanze e senza che i neonati potessero ricevere cure adeguate, la maggior parte di essi moriva.

La grande abbondanza di informazioni di cui disponiamo su questo gravissimo problema sociale non lascia alcun dubbio sul fatto che tra la fine del settecento e l'inizio dell'ottocento non meno dell'80 per cento dei trovatelli morivano nel primo anno di vita, e per lo piú nei primi giorni. I documenti di Rouen ci attestano che la mortalità nell'ospizio locale raggiungeva regolarmente, e a volte superava, il 90 per cento. La situazione era un po' migliore a Parigi, dove, dei 4779 bambini accolti dall'Hôpital des enfants trouvés nel 1818, 2370 morirono nei primi tre mesi e altri 956 nel corso del primo anno, cosicché la mortalità, per il periodo compreso tra la nascita e il dodicesimo mese, fu inferiore al 70 per cento. I tre mesi invernali, dice un commentatore, produssero come al solito una «vera ecatombe».

Tutto questo non era un mistero. Le madri che affidavano i loro figli all'ospizio sapevano benissimo che li consegnavano alla morte con quasi la stessa certezza che se li avessero buttati nel fiume. L'opinione pubblica era comprensibilmente sgomenta. Il decreto napoleonico, per quanto ispirato alle migliori intenzioni, si risolveva in pratica nella legalizzazione dell'infanticidio. Un autore suggerí che gli ospizi affiggessero un cartello con la scritta: « Si uccidono bambini a spese del governo ».

Pare dunque ragionevole concludere, alla luce di questi dolorosi documenti, che l'infanticidio, nascosto o palese, fu un fattore importante almeno quanto il celibato nel controllo dell'incremento demografico dalla metà del settecento alla metà dell'ottocento. È chiaro anche che un nuovo atteggiamento nei confronti dei bambini, e particolarmente dei neonati, si impose successivamente. Ciò che allora sembrava un fatto normale ci appare oggi come una crudeltà intollerabile; bisogna però ammettere che anche l'atteggiamento che abbiamo visto cosí diffuso nel periodo studiato non è del tutto incomprensibile. I neonati somigliano poco agli esseri umani piú maturi o anche ai bambini di qualche anno. Un forte sentimento materno sorge evidentemente solo il secondo o il terzo giorno dopo il parto, quando comincia l'allattamento. Non sorprende perciò che tanti popoli, in tante epoche diverse, abbiano accettato come una cosa ovvia l'eliminazione dei bambini indesiderati. Ad ogni modo in Europa, tra il 1750 e il 1850, l'infanticidio continuò ad essere diffuso, nonostante tutte le denunce della Chiesa e tutte le pene comminate dalla legge.

Gli studi sul celibato e sull'infanticidio come mezzi di controllo dell'incremento demografico sono rivelatori, ma tuttavia poco hanno contribuito alla comprensione dell'ascesa straordinaria della popolazione europea che ebbe inizio attorno al 1760 e che va sicuramente annoverata tra gli sviluppi piú portentosi nella storia moderna. L'Europa del 1850, con una popolazione di 265 milioni circa, era chiaramente molto diversa dall'Europa di un secolo prima, che contava una popolazione complessiva di circa 140 milioni di individui. La spiegazione di questa profonda trasformazione si è rivelata un problema di non facile soluzione.

Se si considerano i principali mezzi di controllo dell'incremento demografico, è indiscutibile che nel secolo che va dalle guerre napoleoniche alla prima guerra mondiale i conflitti internazionali furono meno frequenti, meno diffusi e meno letali che in passato. Anche la fame fu meno frequente e assunse caratteri meno estremi col perfezionarsi delle comunicazioni e dei mezzi di trasporto. Contrariamente a quanto comunemente si ritiene, ci furono importanti progressi anche nel campo della scienza medica e dell'igiene, in particolare nella cura e nella prevenzione della malattia responsabile delle maggiori stragi dopo la scomparsa della peste: il vaiolo. L'inoculazione di virus del vaiolo a centinaia di migliaia di bambini verso la fine del settecento e la vaccinazione di altre migliaia con vaiolo bovino in seguito alle scoperte di Edward Jenner nel 1798 fornirono un grado elevatissimo di immunità nei confronti della malattia, contribuendo a ridurre in modo decisivo il tasso della mortalità infantile, che era tanta parte della mortalità totale.

Nel frattempo mezzi di controllo supplementari, come il celibato e l'infanticidio, rimasero in vigore. Le restrizioni governative ai matrimoni tra poveri si mantennero in effetti in molti stati tedeschi finché non furono bandite, nel 1868, dal Norddeutscher Bund, la lega degli Stati tedeschi a nord della linea del Meno. Anche il controllo dei genitori sul matrimonio continuò fin nel novecento inoltrato. Inoltre l'esposizione, l'abbandono e l'uccisione di neonati continuarono a crescere tenendo il passo con l'aumento della popolazione, e gli ospizi dei trovatelli venivano a consumare quasi la metà delle entrate degli enti locali. Eppure sembra chiaro che i controlli dell'incremento demografico che hanno assolto il loro compito per secoli diventano improvvisamente inadeguati ad arginare la prepotente ondata di marea. Quali sono le cause di questa situazione?

Se Malthus aveva ragione nel sostenere che la popolazione tende sempre a crescere al livello dei mezzi di sussistenza disponibili, si dovrebbe forse cercare la risposta a questo problema in alcuni mutamenti fondamentali nell'approvvigionamento di cibo in Europa, che permisero di sfamare, non importa in che modo, piú di 100 milioni di nuove bocche. Tale mutamento si verificò di fatto pressappoco in coincidenza con l' « esplosione demografica » europea. Alla metà del settecento due piante importate dall'America, la patata e il mais, cominciarono a essere coltivate su larga scala, la prima nell'Europa settentrionale e centrale, la seconda nell'Europa meridionale.

Entrambe le piante avevano un eccezionale valore nutritivo, erano facili da coltivare e davano raccolti abbondanti. L'Irlanda, che fu all'avanguardia nella coltivazione delle patate, divenne il classico esempio di un paese in cui ci si sposava giovani e si metteva su una famiglia di sei o anche otto persone (piú un maiale), che tirava avanti con dieta formata quasi esclusivamente di patate. Verso la fine del settecento la stessa dieta era stata adottata anche in altre parti d'Europa ad alta densità di popolazione. Nelle Fiandre, nella Renania, nella Germania sud-occidentale e in Svizzera, dovunque la proprietà terriera era molto frammentata, famiglie assai estese di poveri vivevano dei prodotti di piccoli appezzamenti coltivati a patate. Le nuove piante coltivate diedero ovunque un aumento del 25-30 per cento nella quantità di cibo, che risultava disponibile anche alle classi sociali piú basse; a questa maggiore disponibilità seguí un'improvvisa espansione demografica. A lungo andare altri due fattori – lo sviluppo industriale e una massiccia emigrazione – sollevarono gli europei dal diffuso timore della sovrappopolazione.

Bisogna ammettere che questa tesi non è stata ancora universalmente accettata, forse perché appare troppo semplice e perché non è stata ancora studiata a fondo. Economisti e demografi preferiscono lavorare con le statistiche e sono riluttanti a occuparsi di problemi concernenti il periodo prestatistico. Essi lotteranno valorosamente con gli scarsi dati numerici che possono essere ricavati dai documenti anagrafici distrettuali, nel tentativo di stabilire tassi di natalità e di mortalità, ma non potranno elaborare alcuna statistica sulla produzione di patate o di mais e resteranno molto scettici sul valore delle testimonianze di carattere letterario.

La pressione della luce laser

Le forze esercitate da un fascio di luce laser focalizzato sono abbastanza intense da far muovere liberamente piccolissime particelle in vari mezzi. Ecco alcune possibili applicazioni basate su questa recente scoperta

di Arthur Ashkin

È noto a tutti che la luce trasporta energia, mentre è meno ovvio il fatto che la luce trasporta anche quantità di moto. Quando siamo alla luce solare ci rendiamo perfettamente conto del calore associato alla luce, ma non sentiamo alcuna spinta. Ciò nonostante, è un dato di fatto che tutte le volte che la luce ordinaria colpisce un oggetto, l'impatto esercita una piccola forza sull'oggetto. La pressione che ne risulta è chiamata pressione di radiazione.

La possibilità che la luce potesse esercitare una pressione risale a Johannes Keplero, il quale nel 1619 postulò che la pressione della luce fosse responsabile del fatto che le code delle comete sono sempre dirette lontano dal Sole. La teoria corpuscolare della luce introdotta da Isaac Newton rese piú plausibile il concetto di pressione di radiazione e stimolò molti tentativi sperimentali di misurarla. Nei secoli XVIII e XIX tutti questi tentativi di rivelare la pressione della luce non riuscirono a mettere in evidenza alcuna forza che non potesse essere attribuita alla convezione nell'aria causata dal calore. Nel 1873 William Crookes credette di aver scoperto la pressione della luce in un'ampolla parzialmente evacuata, mentre invece aveva soltanto inventato il radiometro. (Il piccolo giocattolo ad albero rotante esposto in molti negozi di ottica è un radiometro. Esso è sensibile non alla pressione della luce, ma alle forze esercitate dal bombardamento molecolare sulle superfici riscaldate dalla luce. Tali forze termiche sono chiamate forze radiometriche.) Sempre nel 1873 James Clerk Maxwell calcolò l'intensità della pressione di radiazione basandosi sulla sua nuova teoria delle onde elettromagnetiche. Il valore calcolato era estremamente piccolo per le sorgenti di luce ordinarie; per esempio, nell'esperimento di Crookes era di quattro o cinque ordini di grandezza inferiore a quello osservato per le forze radiometriche.

L'esistenza della pressione di radiazione in assenza di effetti termici perturbanti fu alla fine provata sperimentalmente verso la fine del secolo scorso da Ernest F. Nichols e da G. F. Hull negli USA e da P. N. Lebedev in Russia. In entrambi gli esperimenti la pressione di radiazione esercitata da una sorgente di luce venne rivelata dal moto torsionale di una laminetta appesa sotto alto vuoto a un filo sottile. L'intensità della forza misurata in questo modo confermò le previsioni di Maxwell.

Il laser ha aperto nuove vie alla ricerca ottica e ha permesso di ringiovanire i vecchi metodi. Le particolari caratteristiche della luce laser che hanno reso possibili tali innovazioni sono il suo alto grado di purezza spettrale e la sua coerenza spaziale. Queste proprietà hanno reso possibile, tra l'altro, di focalizzare un fascio laser in una macchia di raggio molto prossimo al limite teorico di una lunghezza d'onda. Cosí, anche con una potenza di pochi watt, si può ottenere un'intensità di luce monocromatica circa 10 000 volte maggiore dell'intensità ottenibile dall'intero spettro visibile sulla superficie del Sole! Inoltre un fascio laser funziona con un semplice, matematicamente perfetto e ben controllato, profilo di intensità chiamato modo trasversale. Il modo piú utile ha una sezione trasversale con una distribuzione energetica gaussiana, cioè a forma di campana. Un altro importante risultato è stato lo sviluppo dei laser sintonizzabili con i quali si può scegliere a piacere la lunghezza d'onda della luce.

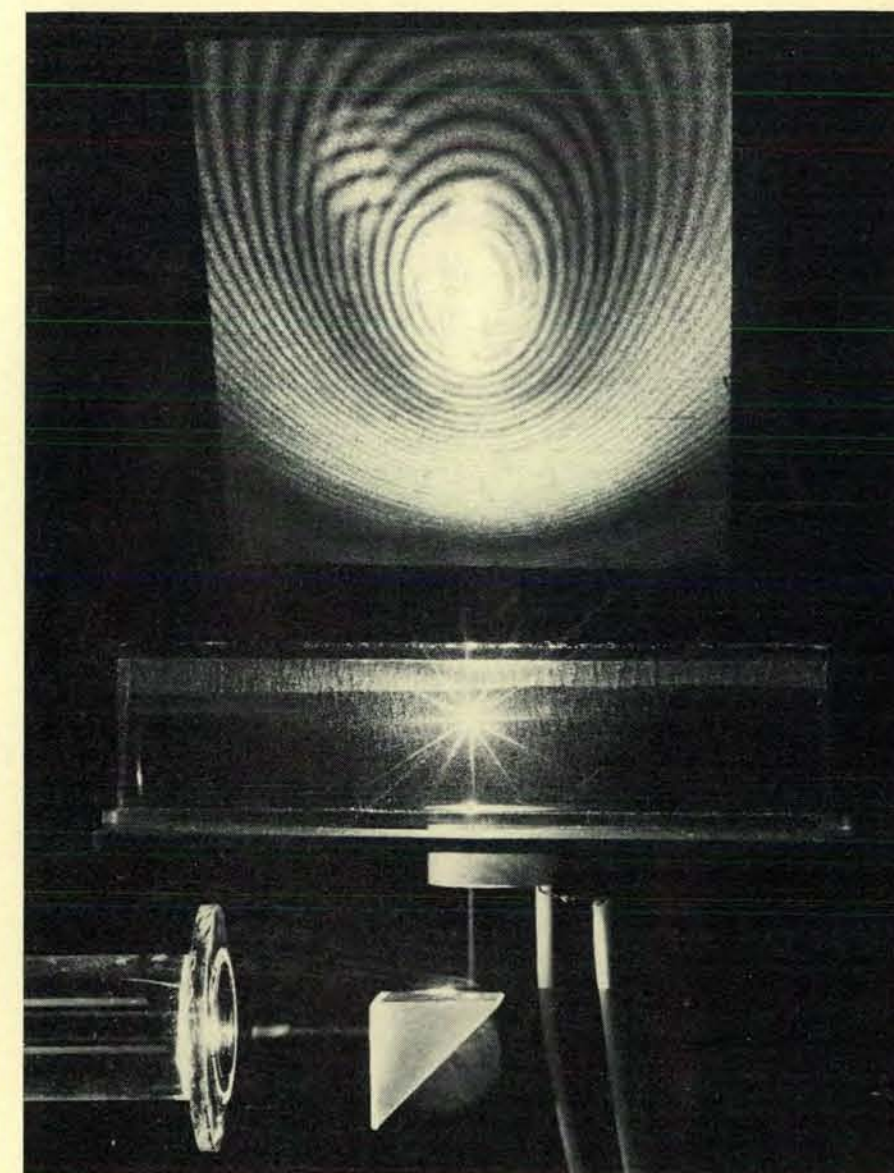
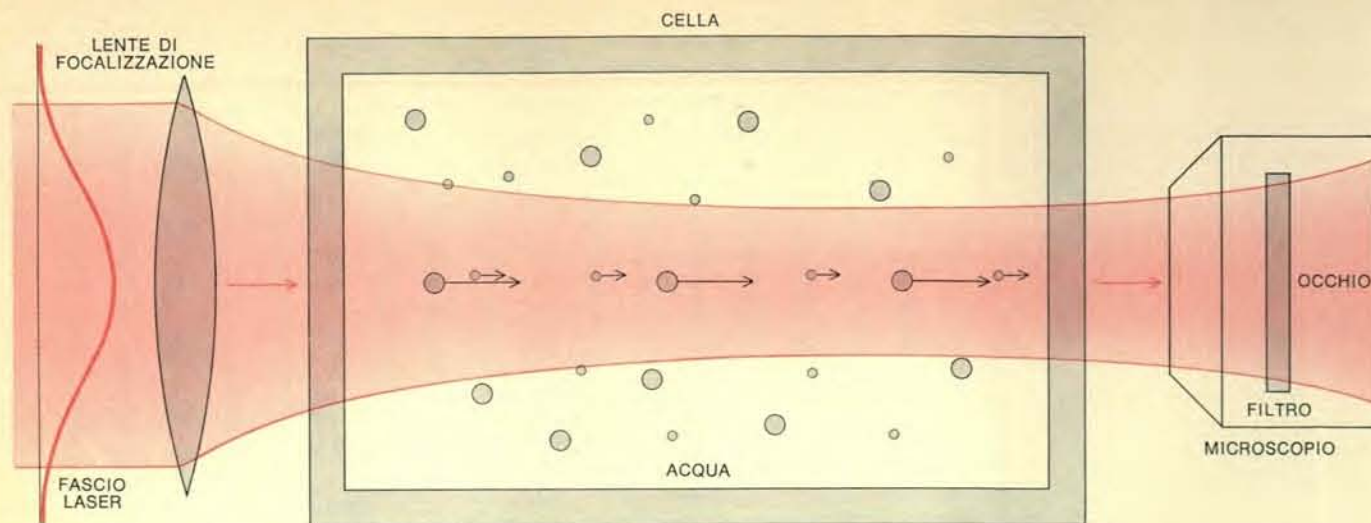
La pressione di radiazione è stata recentemente ristudiata alla luce di queste nuove sorgenti laser e si è trovato che l'effetto è intenso. In effetti si è scoperto che le forze esercitate dalle sorgenti laser sono sufficientemente intense da far muovere liberamente piccole particelle in vari mezzi. Sia per piccolissime particelle macroscopiche sia per atomi e molecole si possono ottenere con continuità accelerazione fino a un milione di volte *g* (un milione di volte l'accelerazione di gravità). Tali scoperte hanno dato origine a nuove applicazioni basate sul moto di corpuscoli guidati dalla pressione di radiazione. Questa pressione piuttosto esotica ha anche rivelato aspetti singolari, alcuni dei quali mai scoperti prima e altri dovuti alla natura stessa della luce laser. Alcune delle possibili applicazioni sono la separazione di particelle nei liquidi, la levitazione ottica di particelle in aria e nel vuoto, l'accelerazione ad alta velocità di particelle elettricamente neutre, la separazione isotopica e l'analisi di fasci atomici.

Il punto di partenza di tutto questo lavoro è stata la semplice constatazione da parte dell'autore che la pressione di radiazione della luce laser potrebbe essere piuttosto intensa anche con le modeste potenze ottenibili dai laser continui. Venne eseguito il seguente semplice calcolo degli ordini di grandezza. Si supponga di focalizzare un watt di luce verde di un laser continuo (con una lunghezza d'onda di circa 0,5 micron) su una macchia di raggio uguale alla lunghezza d'onda della luce. Qual è la forza esercitata su un corpuscolo sferico delle stesse dimensioni posto nel fuoco? Supponendo che il corpuscolo si comporti come uno specchio perfetto, si calcola una forza di circa 10^{-3} dyn. Se il corpuscolo ha densità unitaria, la sua massa è di circa 10^{-12} grammi. Per la legge di Newton ciò implica un'accelerazione pari a un milione di volte l'accelerazione di gravità – chiaramente una grande accelerazione!

Tali calcoli suggerirono di tentare un esperimento per mettere in moto dei corpuscoli con la pressione della luce. Vennero presi in esame corpuscoli metallici altaménte riflettenti, ma anche con una riflettività del 98 %, l'assorbimento residuo del 2 % avrebbe certamente causato un forte riscaldamento e forse anche la fusione. Ci si trova di nuovo di fronte a problemi termici che furono la disperazione dei primi sperimentatori. Uno degli inconvenienti dell'aumento di intensità luminosa è l'aumento del riscaldamento. La soluzione apparve evidente: usare corpuscoli di materiale dielettrico (non conduttore) trasparente. Pur essendo la riflettività delle superfici dielettriche nude, quali il vetro o la plastica, relativamente bassa, le forze sono ancora considerevoli.

Nell'esperimento seguente, eseguito nel mio laboratorio presso la Bell Telephone Company vennero usate piccole particelle esattamente sferiche di plastica trasparente costruite dalla Dow Chemical. Poiché tali sfere vengono normalmente fornite in acqua, sembrò naturale tentare i primi esperimenti in acqua, la cui alta trasparenza ottica e la cui alta conducibilità termica sarebbero state di ulteriore aiuto nel mantenere fredde le particelle. Poche gocce d'acqua contenenti alcune particelle furono quindi poste in una cella di vetro sotto osservazione di un microscopio e un fascio verde di un laser a ioni di argo venne focalizzato sulla cella dal basso. Mediante speciali occhiali che assorbono solo la luce laser fu possibile proteggere gli occhi e osservare le particelle in luce ordinaria. La luce laser era comunque visibile per effetto di una debole fluorescenza gialla che essa produce su quasi tutti gli oggetti colpiti. Risultò quindi abbastanza semplice vedere il fascio, focalizzarlo e manipolarlo muovendo la lente di focalizzazione. Poiché le sfere di plastica avevano la stessa densità dell'acqua, esse restavano praticamente ferme come bersagli fissi. Quando un fascio laser verticale di modo gaussiano, con potenza di circa 10 milliwatt e di diametro di 15 micron venne indirizzato su una particella larga pochi micron, questa cominciò a salire con velocità costante di circa 10 micron al secondo fino a raggiungere la superficie superiore della cella. (La legge di Stokes prevede appunto che una particella in moto in un mezzo viscoso sotto l'azione di una forza costante si muova con velocità costante.)

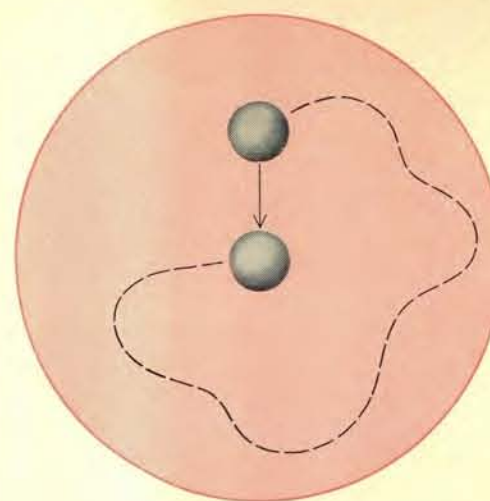
E cosí le particelle si muovevano, ma restavano in sospeso diverse questioni. Per esempio, il moto era realmente dovuto alla pressione di radiazione o a qualche effetto termico residuo, quali la convezione o la fotoforesi (tendenza delle particelle sospese ad avvicinarsi o ad allontanarsi dalla sorgente luminosa)? Nel caso della convezione si dovrebbe muovere verso l'alto l'intera massa liquida trascinandosi dietro le particelle. Nel caso della fotoforesi particelle isolate dovrebbero venire riscaldate asimmetricamente dalla luce e muoversi di conseguenza nel mezzo circostante. Per rispondere a queste domande venne eseguito un secondo esperimento con due modifiche: vennero usate contemporaneamente particelle di due dimensioni (2,5 e 0,5 micron di diametro) e il fascio venne inviato attraverso la cella orizzontalmente. In tal caso, se il liquido attraversato dal fascio si riscaldava, esso doveva tendere a salire verso l'alto anziché fluire lungo l'asse del fascio di luce. Ancora una volta le particelle si muovevano nella direzione del fascio di luce, solo che ora le particelle piú grandi sorpassavano rapidamente le piú piccole (*si veda la figura in alto nella pagina seguente*). Questa osservazione escludeva di per se stessa la convenzione quale possibile causa del moto.

Si era inoltre osservato che, quando una particella raggiungeva la parete piú lontana della cella, rimaneva in ta-

La diffusione di Mie della luce di un fascio laser verticale che mantiene sollevata una sferetta di vetro non conduttore, produce una complessa serie di anelli di interferenza su uno schermo posto con un certo angolo al di sopra della particella. In questo esperimento si può osservare con inconsueta chiarezza la caratteristica struttura anulare associata a questo tipo di diffusione della luce, descritta da Gustav Mie nel 1908.

Un fascio laser focalizzato orizzontalmente viene utilizzato per spingere in una cella piena d'acqua delle sferette di plastica trasparente di due dimensioni: 2,5 micron e 0,5 micron di diametro. Le sfere più grandi si muovono più rapidamente di quelle piccole (*a sinistra*). I movimenti delle particelle vengono osservati al di là dell'estremità destra della cella mediante un microscopio e un filtro che assorbe la luce laser. In questo modo è possibile osservare l'intrappolamento di una particella sulla faccia destra della cella. Una sferetta inizialmente intrappolata nel centro del fascio vaga casualmente allorché si toglie il fascio e ritorna direttamente al centro del fascio allorché lo si ripristina. In questi esperimenti il fascio laser presenta un profilo di intensità (chiamato modo trasversale) la cui sezione ha una semplice distribuzione energetica gaussiana (*curva colorata a forma di campana all'estrema sinistra*).

le posizione, come intrappolata nel centro del fascio; se si interrompeva il fascio la particella cominciava a vagare lontano dal centro. Se si rimetteva il fascio quando la particella si era portata sui bordi del fascio precedente, essa veniva immediatamente risucchiata verso il centro del fascio. Allo stesso modo, se una particella all'interno del liquido veniva illuminata fuori centro presso i bordi del fascio, la si vedeva non solo muoversi in direzione del fascio ma anche risucchiata verso il centro del fascio, dove l'intensità era massima (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina a fronte*). Non si poteva fare a meno di concludere che vi era non solo una forza lungo la direzione del fascio, ma anche una forza trasversale che spingeva le particelle verso il centro del fascio di luce.

Questa osservazione consentí anche di escludere la fotoforesi come causa del moto delle particelle. Nella fotoforesi la forza agente sulla parte calda di una particella è maggiore di quella sulla parte fredda e una particella fuori centro sarebbe stata espulsa dal fascio, al contrario di quanto si era osservato. Inoltre nella fotoforesi una particella parzialmente trasparente riscaldata dal fascio tenderebbe a muoversi all'indietro rispetto alla direzione della luce, ancora in contrasto con quanto osservato. (Questo moto all'indietro, chiamato fotoforesi negativa, si può osservare prontamente facendo cadere un fascio di luce laser sulle particelle di fumo parzialmente trasparenti che fluttuano nell'aria. La sua spiegazione è basata sull'effetto convergente della luce che attraversa la particella e che riscalda la parte della particella posta controcorrente.)

Resta ora da dimostrare come la pressione di radiazione rende conto delle osservazioni eseguite. L'intensità della forza agente su una sfera di plastica si può calcolare sommando gli effetti di tutti i raggi di luce che la colpiscono. Ciascun raggio, essendo parzialmente riflesso e rifratto sulla superficie della sfera, porta via una parte di luce nelle diverse direzioni e dà origine a un contributo alla forza totale. Dal valore della forza quando la particella si trova sull'asse del fascio e dalla legge di Stokes si può calcolare il valore previsto per la velocità della sfera nell'acqua. La velocità calcolata è in accordo con quella misurata nei limiti degli errori sperimentali. Questo accordo è da solo in grado di indicare che non agiscono altre forze intense. Allo stesso modo si può dimostrare che le componenti trasversali della forza agiscono anche su una sfera posta al di fuori dell'asse in un fascio gaussiano. Si consideri un fascio di luce che colpisce una sfera di plastica con un indice di rifrazione maggiore di quello dell'acqua circostante (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 90*). Data una tipica coppia di raggi di luce, *a* e *b*, posti simmetricamente rispetto al centro della sfera, trascurando le riflessioni superficiali e considerando solo la parte trasmessa di ciascun raggio, poiché solitamente è la più intensa e fornisce il principale contributo alla forza, i raggi vengono curvati in modo da originare due forze, F_a e F_b, secondo la direzione delle variazioni di quantità di moto dei raggi. Poiché il raggio *a* è più intenso del raggio *b*, la forza F_a è maggiore di F_b e ci si aspetta una forza trasversale risultante che spinge la sfera ad alto indice di rifrazione verso il centro del fascio, dove l'intensità è massima. Ed è ciò che accade.

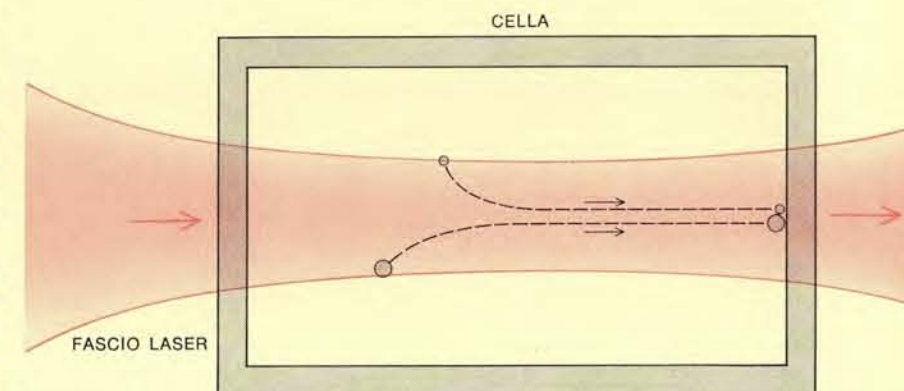
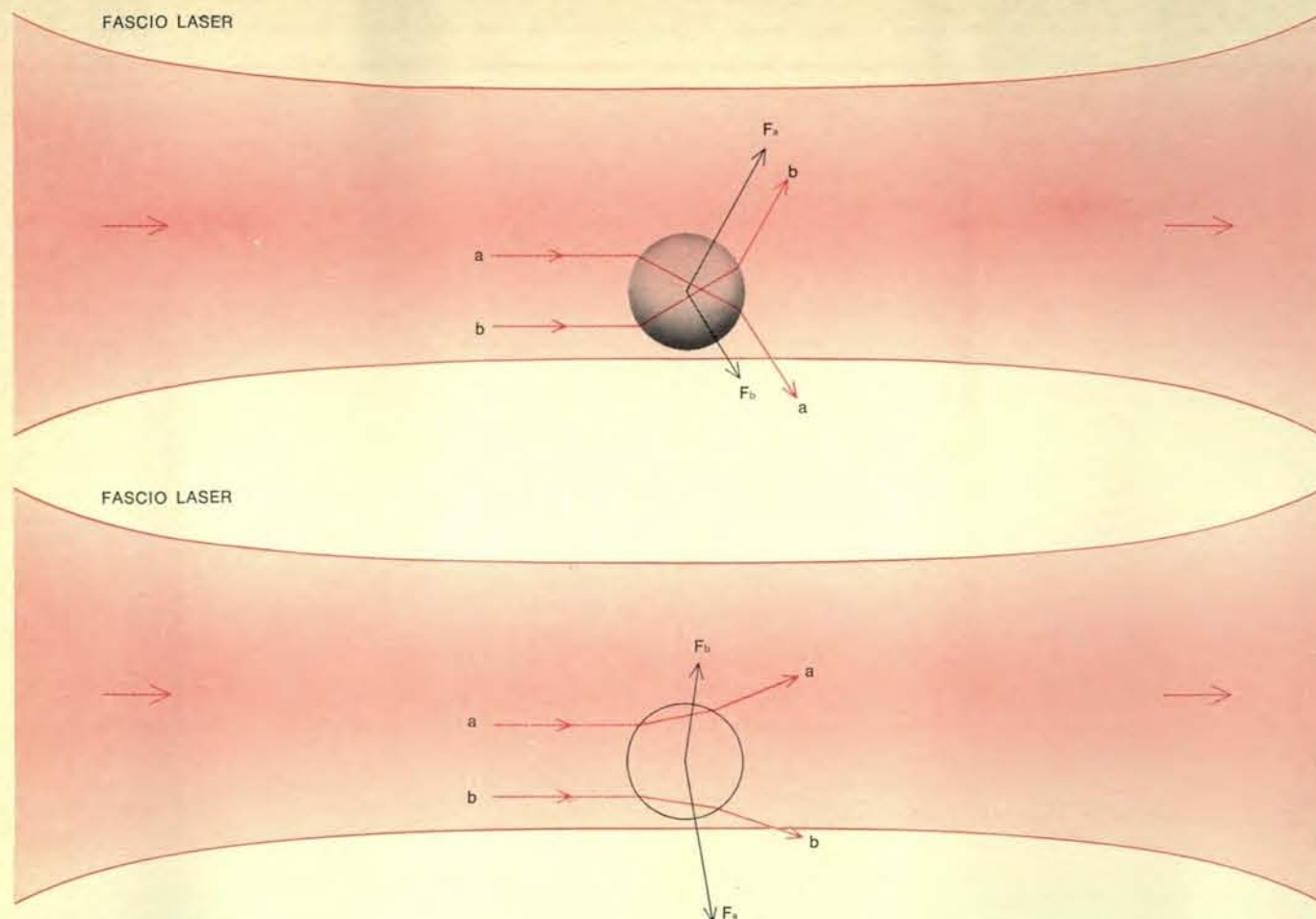
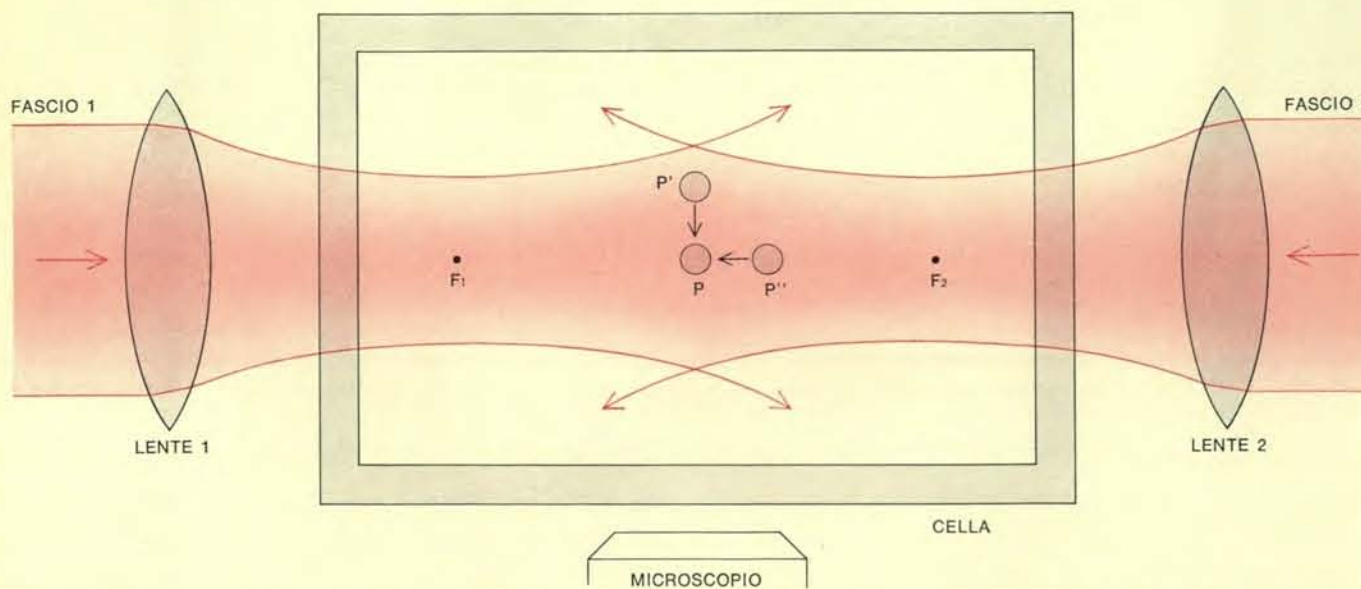
Vi è una evidente conseguenza di questo fatto. Se la sfera avesse un indice di rifrazione minore del mezzo circostante, le forze F_a ed F_b cambierebbero verso e una siffatta sfera dovrebbe essere espulsa dal fascio lontano dalla massima intensità di luce. Anche ciò si verifica. Dopo una estenuante ricerca di particelle a basso indice di rifrazione in un liquido ad alto indice di rifrazione mi è capitato di usare piccolissime bolle d'aria in un liquido viscoso come la glicerina. Dopo tutto le bolle d'aria si comportano come particelle e vi è una discontinuità nell'indice di rifrazione sulla superficie di una bolla, in modo tale che la luce dovrebbe esercitare una forza su di essa. Inoltre una bolla rappresenta quanto di meglio possa esistere in fatto di particelle non assorbenti e ha il più basso indice di rifrazione possibile. Bollicine delle dimensioni desiderate possono essere prodotte mediante un miscelatore di glicerina diluita con acqua. Quando le bolle vengono colpite da un fascio laser, esse si muovono come ci si aspetta, in avanti e fuori del fascio di luce, evitando la luce, al contrario di quanto fanno le particelle di alto indice di rifrazione.

Il quadro dell'origine delle forze trasversali è ora completo. Una importante conseguenza di questo quadro è che è possibile adattare dei fasci di luce capaci di intrappolare le particelle per il solo effetto della pressione di radiazione, formando ciò che potremmo chiamare una « bottiglia ottica ». Una particella ad alto indice di rifrazione posta in un siffatto contenitore immateriale potrebbe essere in equilibrio stabile, poiché qualsiasi spostamento produrrebbe una forza ottica di richiamo. Quando in una cella d'acqua venne montata una effettiva configurazione luminosa di questo tipo, le particelle oscillanti all'interno dei bordi del campo vennero risucchiate nella trappola, dove si mantennero stazionarie (*si veda l'illustrazione in basso nella pagina seguente*). Il fatto che le particelle fossero veramente intrappolate è dimostrabile interrompendo un fascio per un istante. Le particelle sospinte dal secondo fascio cominciarono a sfuggire rapidamente, dopo di che si riaccese il primo fascio: le particelle ritornarono allora al punto di equilibrio, ma più lentamente, dato che venivano spinte dalla forza di richiamo differenziale. Il procedimento potrebbe essere ripetuto più volte con l'interruzione dell'uno o dell'altro fascio.

I liquidi hanno chiaramente rivelato di essere i mezzi sperimentali più idonei per studiare la pressione di radiazione; essi possono essere anche il mezzo preferito per molte applicazioni della pressione di radiazione, quale la separazione di particelle. Particelle differenti viaggiano con velocità differenti nel fascio di luce, quindi possono essere separate. Ho già descritto un esempio di separazione delle sfere di plastica da 0,5 micron da quelle da 2,5 micron basato sulla loro differenza di dimensioni. Se si desidera separare campioni biologici quali virus, macromolecole o cellule in un liquido, la separazione dipende non solo dalle loro dimensioni ma anche da altri fattori, quali l'indice di rifrazione, la forma e l'orientamento degli oggetti. Cosí, per particolari tipi di particelle, questo metodo di trattare la separazione di particelle potrebbe rivelarsi ragionevolmente più adatto delle attuali tecniche di separazione basate sull'uso dell'ultracentrifuga. In tutte queste applicazioni è necessario prendere le opportune precauzioni per evitare un eccessivo riscaldamento.

Consideriamo ora delle particelle in un mezzo più rarefatto quale l'aria o addirittura il vuoto; in tal caso le particelle si muovono più velocemente e la gravità gioca un ruolo più importante che nei liquidi. In particolare la realizzazione di una bottiglia ottica in aria costituirebbe una dimostrazione della levitazione ottica, nella quale le forze ottiche sostengono fisicamente una particella. In un certo senso ciò costituirebbe l'attuazione di una ricerca proposta nel 1909 da Peter J. W. Debye per una situazione in cui la pressione di radiazione fosse abbastanza intensa da neutralizzare la gravità. Tale proposta faceva parte della tesi di laurea di Debye sulla pressione di radiazione. Come esempio di neutralizzazione della gravità, Debye considerò il caso di corpuscoli vicini al Sole; in quel caso la levitazione avrebbe solo creato un equilibrio indifferente. Invece, come dimostrano i nostri esperimenti, sulla Terra è possibile un tipo di levitazione con equilibrio stabile con una semplice bottiglia ottica costituita solo da un singolo fascio di luce.

Ricorrendo alla tecnica di levitazione col laser, si trovò che una frazione di watt di luce laser era sufficiente per sostenere particelle di circa 20 micron di diametro. La sfera trasparente di vetro fu posta su una lastra di vetro all'interno di un'ampolla che serviva a ridurre le correnti d'aria. Sulla sfera venne quindi focalizzato un fascio verticale con potenza di circa 250 milliwatt. Il fascio esercitava sulla particella una forza verticale corrispondente a un'accelerazione di diversi *g*. Lo scopo che ci si proponeva era quello di sollevare la sfera al di sopra della lastra di base.

Sfortunatamente lo schema sopra descritto non funzionò. Il guaio era che i corpuscoli si attaccano tenacemente a qualunque superficie per effetto delle forze di coesione molecolare note come forze di Van der Waals; per un corpuscolo di 20 micron la forza attrattiva corrisponde a un'accelerazione di circa 10 000 *g*. Era però possibile agitare decisamente la particella con un secco colpo alla lastra; questo fatto suggerí una tecnica più controllata per spezzare i legami di Van der Waals, e cioè le vibrazioni acustiche. Un breve impulso di energia acustica trasmesso alla lastra da un cilindro ceramico piezoelettrico era sufficiente per fare agitare momentaneamente la particella. Una volta libera, la pressione della luce prendeva il sopravvento e la particella cominciava a salire nel fascio verticale divergente, fermandosi in quel punto di equilibrio al di sopra della lastra nel quale la pressione di radiazione e la gravità coincidevano. La particella era stata sollevata!

Poiché questo esperimento richiedeva una particella di alto indice di rifrazione era facile dare alla particella una stabilità trasversale rispetto al

Le particelle illuminate nei pressi dei bordi di un fascio laser di modo gaussiano vengono non solo spinte nella direzione della luce ma anche risucchiate verso il centro.

L'indice di rifrazione di una particella rispetto al mezzo circostante è l'elemento responsabile del fatto che il fascio laser spinga la particella verso il centro del fascio o lontano da esso. Il disegno in alto mostra le forze associate alla rifrazione di una tipica coppia di raggi di luce (a, b) quando attraversano fuori centro una sfera con indice di rifrazione maggiore di quello del mezzo circostante. La forza F_a è maggiore di F_b, perciò si ha una componente trasversale risultante verso il centro del fascio. Il disegno in basso illustra invece le corrispondenti forze nel caso di una sfera attraversata fuori centro con indice di rifrazione minore di quello del mezzo circostante. La rifrazione dei raggi di luce è invertita; poiché F_a è ancora maggiore di F_b, ma orientata ora lontano dal centro, vi è una forza risultante trasversale che allontana la particella dal centro. Però in entrambi i casi le due forze F_a e F_b hanno anche componenti in grado di spingere la sfera nella stessa direzione della luce.

La «bottiglia ottica» illustrata in questo diagramma è realizzata con due fasci laser di modo gaussiano in direzione opposta. I punti F_1 ed F_2 rappresentano i fuochi dei fasci *1* e *2*, cioè i punti nei quali sono minimi i diametri dei fasci. Al di là dei fuochi i fasci si allargano per diffrazione. Una sferetta nel punto di simmetria P è in equilibrio, poiché qualsiasi spostamento si traduce in una forza di richiamo. In P' le forze trasversali di ciascun fascio rimandano le particelle in P. In P'' la forza del fascio *1* diminuisce; il fascio *2* è più concentrato e quindi la sua forza aumenta, rimandando la particella in P.

punto di equilibrio. Quindi è possibile ottenere la levitazione con una particella in quiete in una posizione di equilibrio stabile. Eccettuata una tecnica basata su particelle superconduttrici, tutti gli altri schemi di levitazione basati sulle forze elettromagnetiche richiedono il moto della particella sollevata. In tali schemi o l'equilibrio è dinamico oppure è necessario qualche tipo di retroazione negativa per correggere la posizione della particella quando essa si muove.

Una volta che la particella sia intrappolata essa resta sollevata fino a quando su di essa viene focalizzata la luce. Spostando la lente si può spostare il fuoco del fascio e quindi la posizione della particella con grande precisione. Una particella sollevata in questo modo può essere fotografata mediante la sua stessa luce diffusa *(si veda l'illustrazione a pagina 93)*.

La particella sollevata può anche essere osservata con precisione con un microscopio messo a fuoco su di essa. Questa possibilità fu utilizzata in un interessante esperimento volto a misurare l'intensità delle forze di richiamo ottico nella bottiglia ottica. Colpendo lateralmente la particella con un secondo fascio si determinò la quantità di potenza necessaria per poter alla fine espellere la particella dalla bottiglia. In questo modo si trovò che la forza trasversale di richiamo poteva raggiungere il valore corrispondente a un'accelerazione di 0,5 *g* per una particella fuori asse quando la forza verticale di levitazione corrispondeva a *g*.

La tecnica della levitazione permette quindi una precisa micromanipolazione di corpuscoli, possibilità questa già fine a se stessa. Per esempio, il fatto di poter introdurre un corpuscolo e tenerlo fermo come bersaglio per un laser a impulsi di alta potenza è importante per la produzione di plasmi prodotti con laser nella ricerca termonucleare. Allo stesso modo la tecnica della levitazione è lo strumento ideale per lo studio della diffusione della luce da piccole sfere dieletriche, fenomeno noto come diffusione di Mie. La teoria di questo tipo di diffusione, trattata da Gustav Mie nel 1908, porta alla spiegazione di molti fenomeni, dall'arcobaleno alla distribuzione angolare della luce diffusa da inomogeneità rifrangenti nel passaggio attraverso mezzi otticamente trasmissivi. Sollevando una sola particella di forma e dimensioni note si può misurare l'entità della diffusione di Mie senza alcuna perturbazione.

In una dimostrazione sperimentale della diffusione di Mie in avanti prodotta dallo stesso fascio laser di sostegno è possibile produrre una complessa serie di anelli di interferenza *(si veda l'illustrazione a pagina 87)*. Questi anelli, dovuti alla natura fondamentalmente ondulatoria della luce, si possono osservare in questo caso con insolita chiarezza. È anche possibile utilizzare la distanza degli anelli nella diffusione di Mie a 90 gradi per ottenere una misura precisa del diametro della particella. Ciò è dovuto al fatto che gli anelli a 90 gradi vengono prodotti dall'interferenza di due sorgenti brillanti di distanza nota *(si veda la figura in questa pagina)*.

Ovviamente vi sarebbero ben altre possibilità se fosse possibile ottenere la levitazione nell'alto vuoto. L'alto vuoto elimina le forze viscose che in aria smorzano tutti i moti. Le forze ottiche, eccettuato un esiguo smorzamento della radiazione, sono senza attriti e una particella posta in oscillazione o fatta ruotare su se stessa continuerebbe indefinitivamente nel suo moto. In tali casi sono possibili anche esperimenti inerziali, forse anche esperimenti che utilizzino il momento angolare, o rotazionale, della luce. Il principale problema è come impedire che le fluttuazioni della luce laser perturbino la particella. Finora si è potuta ottenere la levitazione fino a pressioni dell'ordine di 1 torr (10^{-3} atmosfere) prima di perdere le particelle. Alla pressione di un torr lo smorzamento viscoso è già ridotto e si instaurano delle oscillazioni dovute alle perturbazioni che portano alla fuga della particella. È possibile stabilizzare la potenza laser e realizza-

Due distinte sorgenti luminose appaiono quando una particella sollevata viene osservata con un angolo di 90 gradi mediante la sua stessa luce diffusa con un microscopio messo a fuoco sulla particella stessa *(a sinistra in alto)*. Ponendo uno sfondo chiaro sul retro della particella *(in alto a destra)* si può osservare più facilmente il profilo della particella e la disposizione delle sorgenti rispetto a essa. Il diagramma inferiore spiega l'origine delle sue sorgenti a 90 gradi. Un raggio rifratto emerge nei pressi della parte superiore della particella, mentre un raggio riflesso più debole emerge dalla particella nei pressi della parte inferiore. Queste due sorgenti interferiscono per formare le figure di interferenza di campo remoto a striature orizzontali su uno schermo.

re bottiglie ottiche piú potenti con diversi fasci e ciò renderebbe attuabile la levitazione a pressioni ancora inferiori. Molto probabilmente sarebbe sufficiente introdurre un semplice sistema ottico di retroazione basato sulla posizione e sulla velocità della particella: in questo modo si potrebbe contemporaneamente stabilizzare la potenza laser e la posizione della particella che potrebbe essere resa molto sensibile.

Un'altra applicazione potenziale della pressione di radiazione nel campo dell'alto vuoto è l'accelerazione di corpuscoli neutri ad alta velocità. Se si applica un fascio laser di alta potenza a una particella, questa viene rapidamente accelerata nella direzione dell'asse del fascio mentre viene intrappolata trasversalmente dal fascio. Ci si potrebbe chiedere che cosa limiti la massima velocità raggiungibile. La risposta è probabilmente solo la fusione e la vaporizzazione della particella. Ponendo come limite la fusione, se si conosce il coefficiente di assorbimento ottico della particella, si può conoscere la quantità di luce che può essere applicata alla particella e si può calcolare la velocità finale. I migliori vetri ottici disponibili hanno un coefficiente di assorbimento di circa 3×10^{-5} cm^{-1}. (Questo numero è importante nel campo delle comunicazioni ottiche attraverso fibre di vetro e si stanno facendo molti sforzi per riuscire a diminuirlo.) Usando questo valore si ricava una velocità finale di circa 3×10^{8} centimetri al secondo per una particella da 0,5 micron, velocità incredibile per una particella macroscopica. Se una siffatta particella colpisse un bersaglio o un'altra particella con le stesse dimensioni e velocità, si potrebbe ottenere un impulso con una potenza dell'ordine di 10^{11} watt per circa 10^{-13} secondi. La particella potrebbe vaporizzare e formare un plasma la cui temperatura dovrebbe essere circa 50 volte superiore a quella necessaria per le reazioni termonucleari nel deuterio. Questo metodo potrebbe essere perciò di grande interesse nella ricerca termonucleare e in tutti quei campi nei quali è importante poter disporre di brevi impulsi di alta potenza. L'apparecchiatura necessaria per un siffatto acceleratore di particelle rientra nelle capacità dell'attuale tecnologia. Sfortunatamente essa dovrebbe essere lunga all'incirca come l'acceleratore lineare di Stanford (circa 4 km) per la necessità di mantenere l'intensità abbastanza bassa allo scopo di evitare assorbimenti non lineari. Un tale esperimento non sarebbe ovviamente una facile impresa.

Finora ho descritto gli effetti prodotti dalla concentrazione di luce laser su corpuscoli non assorbenti con diametri compresi tra 0,1 e piú di 100 volte la lunghezza d'onda della luce. Se prendiamo in considerazione particelle veramente piccole come gli atomi, il cui diametro è qualche millesimo della lunghezza d'onda, ci si potrebbe aspettare effetti di pressione trascurabili, poiché le onde tendono a diffrangere su tali piccoli oggetti senza venire troppo deviate. Sebbene la luce attraversi generalmente i gas con poche interazioni, esistono importanti eccezioni. Per poter comprendere questi casi particolari ci si deve rifare alla teoria dei quanti, che è alla base delle nostre attuali conoscenze sulla luce e la materia. La luce, oltre a essere un fenomeno ondulatorio, possiede anche una natura corpuscolare. Un fascio di luce risulta essere l'insieme di quantità indivisibili di energia chiamate fotoni, ciascuna con una ben definita energia e quantità di moto. Allo stesso modo è noto che gli atomi costituiscono una struttura risonante che può esistere solo in particolari stati energetici. Gli atomi interagiscono fortemente con la luce quando l'energia dei fotoni è esattamente sufficiente a portare l'atomo da uno stato energetico a un altro. Questo è un fenomeno di risonanza. La misura dell'intensità dell'interazione di risonanza è una quantità chiamata sezione d'urto di assorbimento. Il concetto di sezione d'urto di assorbimento è basato sull'ipotesi che ogni fotone che colpisce tale area venga assorbito. Per atomi in risonanza la sezione d'urto di assorbimento è all'incirca uguale al quadrato della lunghezza d'onda. Poiché si può focalizzare un fascio laser su una macchia avente una area teorica quasi uguale al quadrato della lunghezza d'onda, questa scoperta implica che un singolo atomo opportunamente disposto nel fuoco di un tal fascio ne assorba quasi tutta la luce. Ciò risulta in pratica vero solo per basse intensità dove mancano effetti di saturazione. In ogni caso gli atomi in risonanza sono il materiale piú assorbente che si conosca per la luce; questo fatto implica notevoli effetti della pressione di radiazione.

Nel processo di assorbimento all'atomo vengono trasferiti sia l'energia che la quantità di moto del fotone. Si consideri, per esempio, un atomo di sodio che si trovi inizialmente nel suo stato fondamentale, o di minima energia, e che assorba un fotone di risonanza della riga gialla « *D* ». L'atomo non solo viene portato in uno stato eccitato, ma subisce un aumento di velocità di circa 2 centimetri al secondo nella stessa direzione della luce incidente. L'atomo resta nello stato eccitato per un tempo medio, chiamato vita media dello stato eccitato, prima di ritornare nello stato fondamentale, cosa che fa spontaneamente con l'emissione di un fotone della stessa frequenza in direzione casuale. Questa emissione imprime all'atomo un altro impulso, diretto casualmente, di due centimetri al secondo. Tutti i successivi assorbimenti ed emissioni spontanei danno luogo a impulsi addizionali diretti secondo il fascio seguiti da impulsi casuali. Il risultato è una forza totale diretta lungo il fascio di luce. L'effetto è simile alla forza che un tubo dell'acqua esercita su una pallina che diffonde il getto in tutte le direzioni.

Questa pressione di radiazione di risonanza, presenta alcuni aspetti singolari. Innanzi tutto essa non continua ad aumentare con l'aumento della potenza ottica ma si satura a un ben definito valore massimo che dipende dalla vita media finita di emissione spontanea degli stati eccitati. Se il valor medio della vita media è di circa 10^{-8} secondi, come per il sodio, ci si deve aspettare che l'atomo sia capace di diffondere al massimo 10^{8} fotoni al secondo. In effetti esso può diffondere solo la metà di tale numero a causa dell'emissione stimolata dallo stato eccitato allo stato fondamentale; in questo processo, che si verifica con alte intensità di luce, l'atomo viene stimolato a restituire un fotone al fascio. Questo fatto da solo porta un contributo trascurabile alla forza, ma fa sí che l'atomo passi solo la metà del tempo nello stato eccitato, dal quale esso

La levitazione ottica di un corpuscolo mediante un fascio laser verticale di luce verde è messa in evidenza nella foto della pagina a fronte. Il corpuscolo, una sferetta trasparente di vetro di 20 micron di diametro, si può vedere sospeso in aria circa un centimetro al di sopra di una lastra di vetro per effetto di un fascio da 250 milliwatt. Sebbene il corpuscolo sia chiaramente visibile a occhio nudo, in questo esperimento esso diffonde abbastanza luce laser da risplendere intensamente; i raggi luminosi emessi dalla sua immagine nella foto sono causati dalla diffrazione sui bordi del diaframma all'interno della camera. Sul percorso del fascio laser è stato introdotto del fumo per renderlo visibile all'uscita dalla lente di focalizzazione (*in basso a sinistra*) e quando vien riflesso verso l'alto da un prisma (*in basso a destra*) prima di entrare nel recipiente di vetro. Il dispositivo visibile al centro in alto è un cilindro ceramico piezoelettrico usato per far vibrare momentaneamente il corpuscolo onde vincere le deboli forze di Van der Waals che lo fanno aderire alla lastra di vetro. La figura di interferenza visibile sullo sfondo del recipiente è prodotta dalla luce diffusa dal corpuscolo a 90°.

I gas possono essere separati mediante la pressione della radiazione di risonanza della luce laser. Nello schema qui proposto la luce laser agisce come una pompa, spingendo la maggior parte degli atomi risonanti del gas (*punti colorati*) nella camera *1*; la luce del laser non ha invece effetto alcuno sugli atomi di gas non risonanti (*punti neri*).

Un analizzatore di velocità a fasci atomici che impiega luce laser in risonanza potrebbe permettere di selezionare atomi di una particolare velocità da un fascio a più velocità. La luce di risonanza diretta radialmente all'interno verso il punto *O* è perpendicolare a un'orbita circolare di raggio *R*. Il collettore *1* rivela gli atomi rifocalizzati di differenti velocità a differenti raggi dopo che essi sono stati deviati di un angolo di 104 gradi. Gli atomi non influenzati da questo effetto raggiungono il collettore 2.

può decadere casualmente per emissione spontanea. Il risultato finale è comunque una forza di pressione di radiazione di risonanza satura corrispondente a un'accelerazione di circa 100 000 *g* sull'atomo.

L'altro aspetto singolare di questo effetto è la necessità di una risonanza che avvenga a valori ben precisi dell'energia. Si consideri un fascio laser sintonizzato in risonanza con un atomo in quiete. Se l'atomo comincia a muoversi nella direzione della luce per effetto della pressione di radiazione di risonanza, in conseguenza dello spostamento Doppler, la risonanza non sarà piú perfetta e la forza diminuirà.

Una delle possibili applicazioni di questa forza è nella separazione dei gas, con la luce usata come pompa per agire selettivamente sugli atomi in risonanza (*si veda l'illustrazione in alto a sinistra*). Si supponga di riempire un recipiente a doppia camera con due gas e di inviare della luce in risonanza con uno solo di essi lungo il tubo aperto che collega le due camere. La forza costante agente sugli atomi risonanti provoca una distribuzione esponenziale di pressione lungo il tubo che comincia da grandi valori nella camera lontana per scendere a valori bassi nella camera vicina quando il sistema raggiunge alla fine l'equilibrio con la forza luminosa. Sul gas non risonante la luce non ha effetto alcuno. In questo modo si potrebbero quindi separare i gas, con un meccanismo simile a quello con cui la forza di gravità costante separa i gas di diverso peso in differenti distribuzioni esponenziali di pressione dell'atmosfera terrestre. Con la pressione della radiazione di risonanza è presumibile che anche i diversi isotopi dello stesso atomo possano essere separati in virtú dello spostamento isotopico nella frequenza di risonanza.

Altre possibili applicazioni delle tecniche della pressione di radiazione riguardano i fasci atomici e molecolari. Da tali fasci si sono ottenute molte conoscenze fondamentali studiando la loro deflessione in campi statici e le loro interazioni con le onde elettromagnetiche e con altre particelle. Ora dovrebbe essere possibile utilizzare le intense forze della pressione di radiazione per deflettere otticamente fasci atomici a grandi angoli e studiarli cosí con un nuovo mezzo. Un possibile schema di analizzatore di velocità seleziona gli atomi di una particolare velocità da un fascio a piú velocità, mentre la radiazione di risonanza viene focalizzata in un punto per generare un campo di forze ottiche uniforme e centrato (*si veda la figura in basso nella pagina a fronte*). Una tale forza radiale costante esiste anche se l'intensità luminosa dovesse variare con la posizione, e ciò per le proprietà di saturazione della forza. Questo campo gode della interessante proprietà che tutti gli atomi risonanti iniettati in un certo punto con una particolare velocità si rifocalizzano in un punto dopo essere stati deviati di 104 gradi, ma con un raggio di curvatura che dipende dalla velocità. Tali grandi deflessioni prive di spostamento Doppler sono possibili poiché tutti gli atomi si muovono su orbite vicine a una circonferenza che passa per il punto di ingresso. Lungo tale circonferenza la forza costante della pressione di radiazione e la forza centrifuga si equilibrano esattamente e non si ha alcun moto nella direzione della luce. La situazione è analoga a quella familiare del moto di una particella che ruota all'estremità di un filo a tensione costante. Se si dispone quindi un collettore a 104 gradi esso può raccogliere atomi di diverse velocità a diversi raggi. Qualsiasi specie non risonante presente nel fascio originario non viene deviata e raggiunge un altro collettore. Per costruire un selettore di velocità di questo tipo nel quale un fascio di atomi di sodio emergenti da un forno riscaldato venga deviato su un raggio di cinque centimetri richiederebbe circa un watt di luce risonante. Qualora si riuscisse ad allargare il fascio di luce convergente a tutto il cerchio e a dare una certa convergenza alla luce lungo l'asse del campo, si potrebbe pensare di intrappolare gli atomi risonanti stabilmente su orbite circolari chiuse. Un tale dispositivo sarebbe, per gli atomi, l'analogo piú prossimo alla bottiglia ottica delle particelle macroscopiche. L'utilizzazione di queste applicazioni della pressione di radiazione per gli atomi richiede laser di sufficiente potenza e sintonizzabilità. Si spera che i rapidi progressi compiuti nel campo dei laser e degli oscillatori parametrici sintonizzabili rendano possibili tali esperimenti.

È ovvio che la storia dello studio della pressione di radiazione è stata in stretta connessione con la storia stessa della scienza. Questa connessione è tuttavia semplicemente un esempio di come l'intera struttura della scienza sia inestricabilmente unita. Le nuove conoscenze e le nuove tecniche scoperte in un campo sono inevitabilmente collegate a nuove conoscenze e tecniche in altri campi.

GIOCHI MATEMATICI

di *Martin Gardner*

La piegatura di un foglio di carta come problema combinatorio

Uno dei più strani problemi non risolti nella moderna teoria combinatoria, proposto molti anni fa da Stanislaw M. Ulam, è quello di determinare il numero di modi differenti di piegare una « mappa » rettangolare. La mappa è previamente segnata lungo linee verticali e orizzontali in modo da formare una matrice di rettangoli uguali. Le piegature si devono limitare alle linee segnate e il risultato finale deve essere un pacchetto con un rettangolo in cima e tutti gli altri incolonnati sotto. Poiché ci sono vari modi di definire cosa si intenda per modi di piegare « diversi » diamone una definizione precisa assumendo che all'inizio le celle della mappa siano numerate consecutivamente da sinistra a destra e dall'alto in basso. Vogliamo sapere quante permutazioni di queste n celle, leggendone la numerazione dalla cima del pacchetto verso il basso, si possono ottenere piegando la mappa. Le celle portano lo stesso numero su ambedue le facce in modo che non ha importanza quale delle due stia « sopra » una volta formato il pacchetto; ciascuna delle due estremità può essere considerata come « cima » del pacchetto, per cui ogni piegatura produce due permutazioni, una inversa dell'altra. La forma rettangolare è irrilevante dato che una piegatura non può comunque far ruotare una cella di 90 gradi: assumeremo quindi senza alterare la natura del problema che le celle siano dei quadrati.

Il caso più semplice è quello di un rettangolo *uno*-per-*n*, ovvero di una semplice striscia di n quadrati: lo si enuncia spesso come il problema di piegare una striscia di francobolli lungo i bordi perforati in modo che tutti i francobolli stiano l'uno sotto l'altro. Anche questo caso particolare è ancora irrisolto, nel senso che non si sono trovate formule esplicite per il numero di permutazioni possibili di n francobolli. Si conoscono però procedimenti ricorrenti (procedimenti cioè che consentono di calcolare il numero di modi di piegare n francobolli una volta noto il numero di modi per n-1 francobolli). Il numero totale di permutazioni di n oggetti è $n!$ (n fattoriale, ovvero $n \times (n-1) \times (n-2) \times \ldots \times 1$). Ora, se la striscia è di due o tre francobolli si possono ottenere per piegatura tutte le $n!$ permutazioni, ma già per quattro francobolli se ne possono ottenere solo 16 delle $4! = 24$ (si veda *Giochi Matematici* in « Le Scienze », n. 19, marzo 1970). Per 5 francobolli il numero di piegature possibili sale a 50 e per 6 a 144. John E. Koehler elaborò un programma per calcolatore col quale si spinse fino a caso di $n = 16$, suscettibile di 16 861 984 piegature distinte, mentre W. F. Lunnon estese questo risultato fino a $n = 24$, avvertendo però della possibilità di errori di macchina per n maggiore di 21.

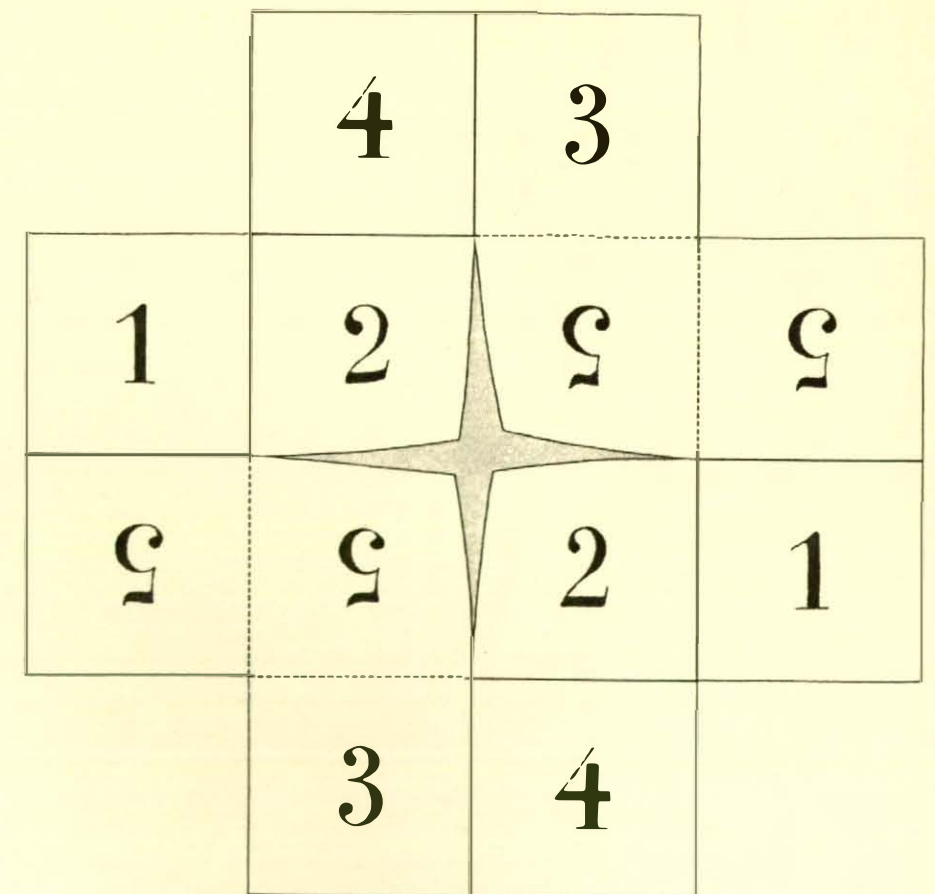
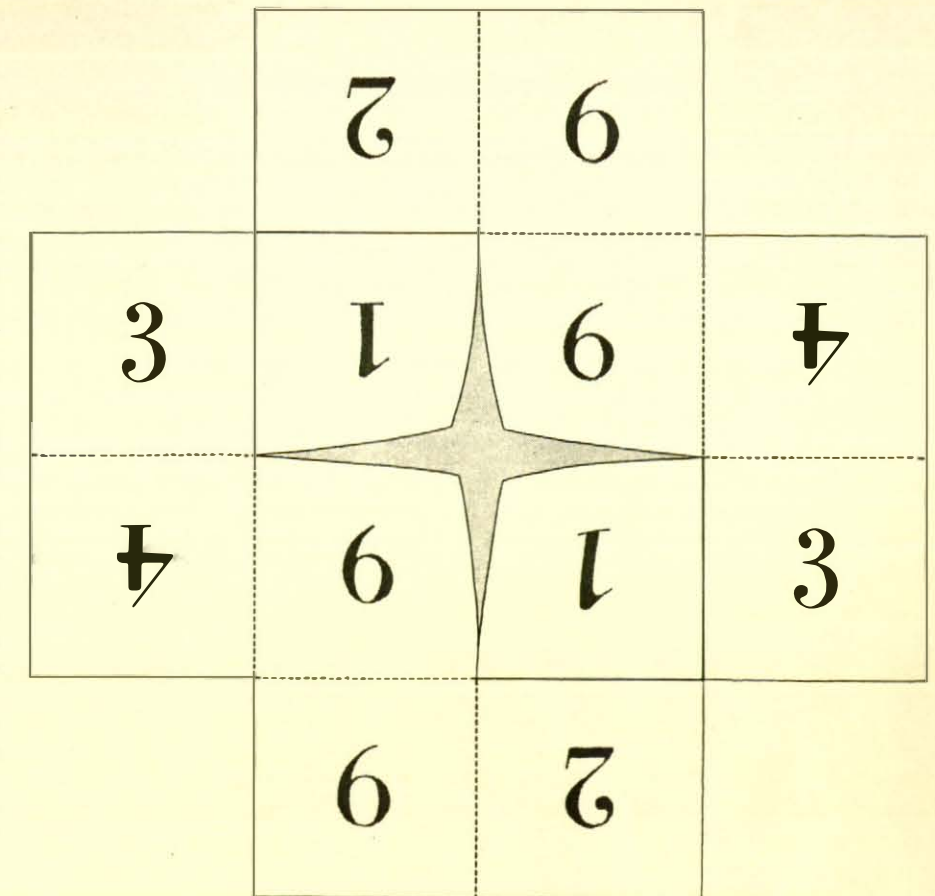
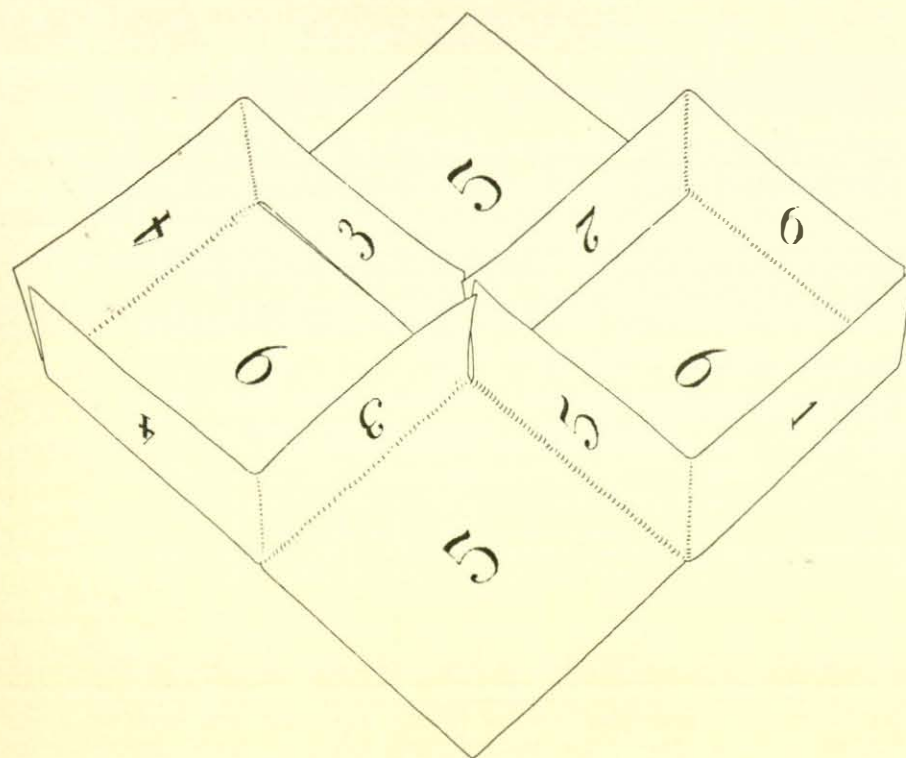
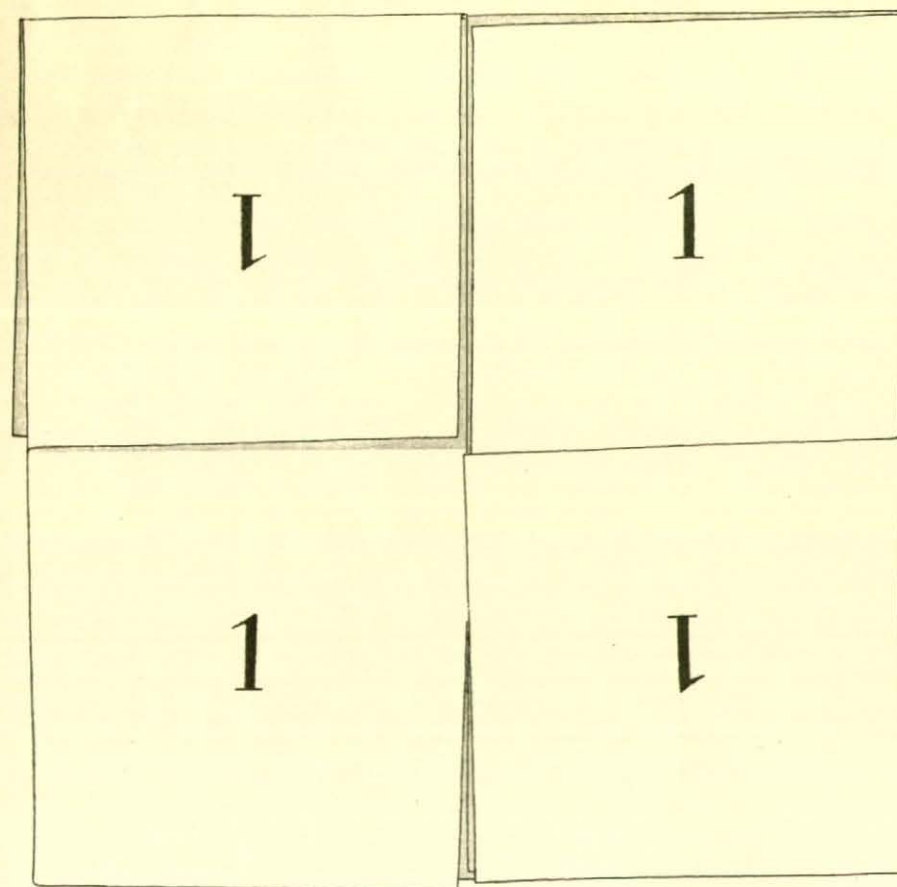
Il « puzzle di Belzebù » di Edward Neale.

Il più semplice rettangolo che non si riduce a una striscia è il quadrato due per due: si può vedere facilmente che si possono ottenere per piegatura solo otto delle $4! = 24$ permutazioni, metà delle quali (come si è già detto) sono l'una l'inverso dell'altra. Il rettangolo due per tre non è così banale, per il fatto che in questo caso diventa possibile infilare una o più celle in « tasche aperte », il che complica enormemente il problema.

Un passatempo divertente è quello di trovare parole di sei lettere in modo che una volta disposte in una mappa 2×3 (scrivendole lettera per lettera da sinistra a destra e dal basso in alto), questa possa essere piegata in un pacchetto che sillabi, dall'alto in basso, un anagramma della parola originale. È opportuno che ciascuna cella sia contrassegnata allo stesso modo su ambedue le facce per facilitarne l'individuazione nel pacchetto: per esempio non è difficile piegare ILL-FED in modo da leggere FILLED e pure SQUIRE in modo da leggere RISQUE. D'altra parte OSBERG (un anagramma del nome dello scrittore argentino Jorge Luis Borges che compare nel romanzo *Ada* di Vladimir Nabokov) non può essere piegato in modo da leggere BORGES, né BORGES può diventare OSBERG. È in grado il lettore di dare una semplice dimostrazione di queste due impossibilità?

Il rettangolo 2×4 è alla base di due problemi dello stesso genere proposti da Henry Ernest Dudeney. Dudeney afferma che ci sono 40 modi di piegare questo rettangolo in un pacchetto con la cella 1 in cima, e sebbene egli, stuzzicando la nostra curiosità, parli di una « leggina » da lui scoperta per individuare certe possibili piegature, non dà alcun cenno sulla sua natura. Personalmente non ho idea di quante siano le piegature possibili delle $8! = 40\,320$ permutazioni.

Quando si considera il più piccolo quadrato non banale, quello 3×3, il problema diventa enormemente complesso. Per quanto ne so, anche se questo tipo di quadrato è stato impiegato in molti giochi matematici sulla piegatura delle mappe, non ne è mai stato calcolato il numero di piegature possibili tra le $9! = 362\,880$ permutazioni. Per esempio, nel 1942 una società americana stampò un pieghevole pubblicitario. Su una faccia del foglio erano stampati i volti di Mussolini e di Hitler, sul retro della cella restante della stessa riga, c'era il volto di Tojo, primo ministro giapponese in quel tempo di guerra; sopra questa cella erano segnate le inferriate di una finestra di una prigione e fra le inferriate la carta veniva tagliata; analogamente sotto la cella, ma sul retro del foglio; il problema consisteva nel piegare il quadrato in modo che alle estremità del pacchetto compaiano due delle facce dietro le sbarre, in modo cioè che da ognuna delle due parti il pacchetto mostrasse il disegno di una finestra e immediatamente sotto una faccia comparisse attraverso le luci ritagliate tra le sbarre. La soluzione non è difficile, anche se richiede, come ultima operazione, di infilare una cella in una « tasca » del pacchetto aperto.

Un problema assai più difficile relativo allo stesso quadrato è quello proposto da Robert Edward Neale, professore di psichiatria e religione. Neale è uomo dai molti interessi; uno di questi è quello degli origami, l'arte orientale di piegare la carta, campo nel quale è

Fronte (in alto) e retro (in basso) del tetraflessagono prima della piegatura.

Prima mossa del tetraflessagono.

Il tetraflessagono ultimato.

ritenuto uno dei piú originali esperti americani. Anche la magia rientra negli interessi di Neale: il suo famoso trucco del coniglio nel cappello a cilindro, fatto piegando una banconota da un dollaro, è tra i piú apprezzati dei maghi. Il cappello è tenuto capovolto; quando viene premuto sui lati salta fuori la testa di un coniglio. (La piegatura in ogni modo è tutt'altro che semplice).

La figura a pagina 96 mostra il « puzzle » di Neale detto di Belzebú, che, si noti, si scrive in inglese Beelzebub. Si cominci col ritagliare un quadrato di carta o di cartoncino e col suddividerlo in nove celle, quindi si contrassegnino le celle con lettere come indicato (la stessa lettera su ciascuna delle due facce di ogni cella). Per prima cosa si cerchi di piegare il quadratò in un pacchetto che sillabi (dall'alto in basso) i seguenti otto pseudonimi dell'angelo caduto, che nel *Paradiso perduto* di Milton segue immediatamente per rango lo stesso Satana: Bel Zeebub, Bub Blezbe, Bub Zelbee, Bub Beelze, Zee Bubble, Buz Lebeeb, Zel Beebub. Se la cosa ci sarà riuscita per questi nomi, si sarà pronti a tentare quello veramente demoniaco di Beelzebub, il vero nome del « principe dei diavoli » (Matteo 12, 24). Il modo veramente difficile di « piegare » quest'ultimo caso verrà spiegato il mese prossimo; chiunque sia riuscito a formare tutti e nove i nomi non si meraviglierà del fatto che il problema generale della piegatura di una mappa sia tuttora irrisolto.

Neale ha inventato una quantità di interessanti problemi sulla piegatura della carta, ma lo spazio non ci consente di esaminarne che altri due. Uno è in effetti una « mappa » non rettangolare con un taglio a croce nel centro (*si veda la figura in alto a pagina 97*). Al posto dei numeri si possono immaginare dei colori disposti in modo che le celle contrassegnate col numero 1 siano tutte di un colore, quelle col numero 2 di un altro e cosí via. Questa volta le facce opposte di una stessa cella sono considerate diverse: dopo aver numerate o colorate le celle come indicato nella parte superiore della figura, si gira il foglio (*di lato*, scambiando la destra con la sinistra) e quindi si numera o si colora il retro come mostrato nella parte inferiore. Il foglio deve ora essere piegato in modo da formare una strana specie di tetraflessagono. (Dei tetraflessagoni si parla nel secondo volume di *Enigmi e giochi matematici*, a cura di Martin Gardner, Sansoni, Firenze, 1968).

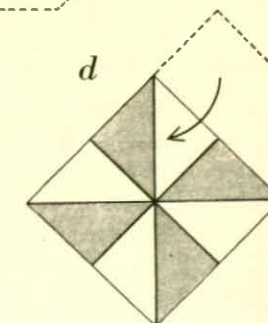
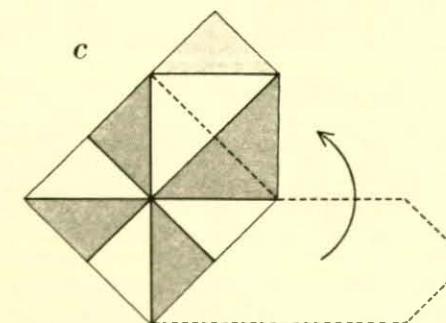
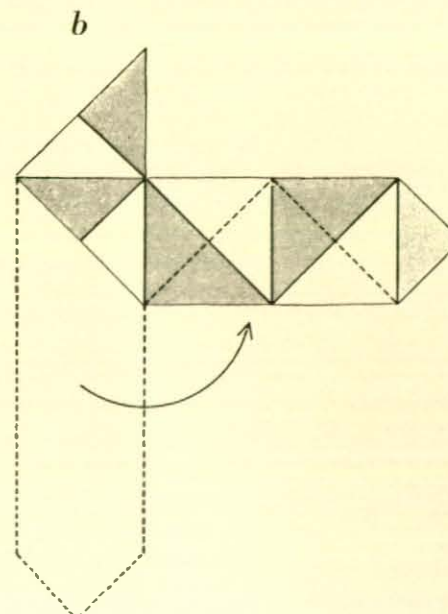
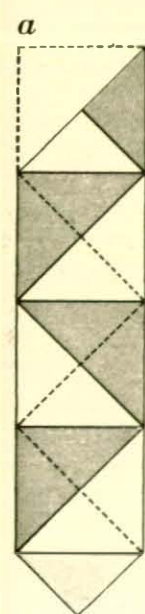
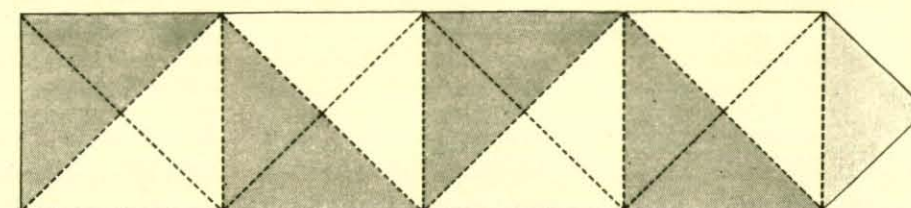
Per ottenere il tetraflessagono si disponga il foglio come illustrato nella parte superiore della figura (per prima cosa sarà utile pieghettare il foglio facendo corrispondere alle linee piene della figura quelle che gli origamisti chiamano « pieghe di monte » e alle linee tratteggiate le « pieghe di valle »). Si afferrino dal di sotto i due angoli liberi delle celle col numero 1, tenendo l'angolo della cella superiore tra le punte del pollice e dell'indice della mano sinistra e l'angolo della cella inferiore tra le punte del pollice e dell'indice della mano destra. A questo punto si deve eseguire una bella operazione, facile a farsi una volta acquistata la pratica, sebbene difficile a descriversi: si tirino gli angoli verso il basso allontanandoli, al tempo stesso, l'uno dall'altro e ruotando le celle 1 in modo che, osservando il foglio dall'alto diventino celle 5; le celle restanti verranno cosí a disporsi in modo da formare due vaschette aventi ciascuna per fondo una cella col numero 6, come mostra l'illustrazione in alto a fronte.

Si trasferisca ora la presa ai due angoli interni delle celle 5, diagonalmente opposti a quelli sui quali si è agito prima. Si spingano questi angoli verso il basso e contemporaneamente li si allontanino l'uno dall'altro. Le vaschette scompariranno e il foglio diventerà un tetraflessagono piatto 2×2, con le quattro celle del tipo 1 da una parte e le quattro del tipo 2 dall'altra (*si veda la figura in basso a fronte*). Se l'ultima operazione non è ben eseguita si troverà una cella 4 al posto di una cella 1 e/o una cella 3 al posto di una cella 2; in ambedue i casi si può facilmente far sparire il quadrato sbagliato, sostituendolo con quello giusto.

La proprietà del tetraflessagono è che, piegandolo a metà (lungo le linee che lo consentono) e riaprendolo lungo la piega centrale, si scopre una nuova « faccia », le cui celle hanno tutte lo stesso numero (o colore); le flessioni necessarie per trovare le facce 1, 2, 3 e 4 sono semplici, non cosí quelle per le facce 5 e 6.

Uno dei piú eleganti puzzle di Neale è quello detto « Le pecore e le capre » che inizia con una striscia di quattro quadrati e una linguetta che andrà poi incollata (*si veda la figura superiore qui sotto*). Si segni dapprima il foglio (piegandolo in un verso e nell'altro) lungo tutte le linee tratteggiate e si colori di nero (*grigio scuro nell'illustrazione*) metà di ciascun quadrato su ambedue le facce.

La striscia va piegata nella successione *a*, *b*, *c*, *d*, indicata: la prima piega è all'indietro (piega di monte) e verso il basso, le altre tre sono pieghe di valle, la prima a destra, la seconda verso l'alto e la terza a sinistra. Dopo l'ultima piega si fa passare la linguetta *sotto* la tasca formata dal triangolo nero in alto a sinistra del quadrato e la si incolla al foglio inferiore del triangolo. Si ottiene cosí un quadrato che presenta quattro triangoli neri e quattro bianchi sulle due facce: sono queste le pecore e le capre.

Il problema consiste nel trasformare il foglio, piegato solo lungo le linee già segnate, in un quadrato della stessa grandezza che sia tutto bianco da un lato e tutto nero dall'altro; in altre parole, nel separare le pecore dalle capre. È assai divertente, anche se non facile, eseguire rapidamente le mosse una volta che si siano appresi i singoli passaggi che verranno illustrati il mese prossimo insieme alla soluzione del gioco del tetraflessagono. (Allo scopo di maneggiare il quadrato piú agevolmente è opportuno dopo averlo piegato e incollato, smussarne tutti gli spigoli).

Il « problema delle pecore e delle capre » di Neale.